

CALCULATION OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF A STRUCTURE WITH CEINCI-LAB AND APPLICATION TO THE REINFORCEMENT OF THE ULEAM PARKING BUILDING

Roberto Aguiar⁽¹⁾, Brian Cagua⁽²⁾, Julia Pilatasig⁽²⁾

⁽¹⁾Profesor. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos. rraquier@espe.edu.ec

⁽²⁾Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. bjcagua@espe.edu.ec
jepilatasig3@espe.edu.ec

Received: April 2021. Accepted: May 2021
Published: May, 2021

ABSTRACT

The structure of the parking of the Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM, which was affected by the 2016 Pedernales earthquake ($M = 7.8$) is quite interesting, so it was decided to use it to present some functions of the **CEINCI-LAB** computer system; The geometry of the frames is generated chronologically using the functions developed in 2008 until the new functions obtained in 2021.

Parallel to the presentation of the functions that lead to the calculation of the lateral stiffness matrix and the stiffness matrix in floor coordinates, for the 3D seismic analysis, aspects related to the damage suffered by the structure during the earthquake of 2016 and the way the structure was repaired and reinforced.

The main flaw that occurred in the original structural design was the generation of short column on the periphery of the building and in the central axis it was more serious since there were slabs at different heights on both sides. The way in which the short column problem was eliminated is indicated.

It indicates how the lateral stiffness matrix is obtained in a reinforced concrete frame, reinforced with concentric diagonals on the ground floor and with TADAS energy dissipators placed on diagonals on the upper floors, modeling the diagonal-dissipative assembly by means of a diagonal equivalent.

keywords: **CEINCI-LAB** computer system. Seismic reinforcement of a parking building.

CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA ESTRUCTURA CON **CEINCI-LAB** Y APLICACIÓN AL REFORZAMIENTO DE PARQUEADERO DE ULEAM

RESUMEN

La estructura del parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM, que fue afectada por el terremoto de Pedernales de 2016 ($M=7.8$) es bastante interesante, por lo que se decidió utilizarla para presentar algunas funciones del sistema de computación **CEINCI-LAB**; la generación de la geometría de los pórticos se la realiza en forma cronológica utilizando las funciones desarrolladas en el 2008 hasta las nuevas funciones obtenidas en el 2021.

Paralelamente a la presentación de las funciones que conducen al cálculo de la matriz de rigidez lateral y de la matriz de rigidez en coordenadas de piso, para el análisis sísmico en 3 D, se presentan aspectos relacionados al daño que tuvo la estructura durante el terremoto de 2016 y la forma como se reparó y reforzó la estructura.

La principal falla que se dio en el diseño estructural original fue la generación de pórticos con *columna corta* en la periferia del edificio y en el eje central fue más grave, ya que se tenía losas a diferente altura a los dos lados. Se indica la forma como se eliminó el problema de *columna corta*.

Se indica la forma cómo se obtiene la matriz de rigidez lateral en un pórtico de hormigón armado, reforzado con diagonales concéntricas en la planta baja y con disipadores de energía TADAS colocados sobre diagonales en los pisos superiores, modelando el conjunto diagonal-disipador mediante una diagonal equivalente.

Palabras Claves: Sistema de computación **CEINCI-LAB**. Reforzamiento sísmico de un parqueadero.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de computación **CEINCI-LAB** fue creado en el año 2008, como una necesidad para poder dictar la cátedra de “Análisis Matricial de Estructuras”, era importante que el estudiante complementara su formación académica con este sistema computacional.

El usuario de **CEINCI-LAB** debe conocer la teoría de estructuras, saber que para analizar estáticamente un pórtico por el método de los desplazamientos, se debe encontrar primero la matriz de rigidez K ; a continuación se encuentra el vector de cargas generalizadas Q ; después, mediante la solución de un sistema de ecuaciones lineales se determina el vector de coordenadas generalizadas q , que contiene los desplazamientos y giros; finalmente se halla las fuerzas y momentos en cada uno de los elementos en coordenadas locales. Aguiar (2020).

En cada una de las etapas de cálculo existen una serie de cálculos que el usuario debe conocerlos. Por ejemplo, para hallar la matriz de rigidez de la estructura K por ensamblaje directo se necesita primero definir la geometría de la estructura; después los grados de libertad de los nudos y se encuentra el vector de colocación de los elementos VC ; a continuación, se halla la matriz de rigidez de cada elemento en coordenadas globales k_3 y finalmente se encuentra la matriz de rigidez K . En el sistema de computación **CEINCI-LAB** se tienen funciones para determinar los grados de libertad, el vector de colocación, la longitud de los elementos y sus cosenos directores y para hallar la matriz de rigidez, el usuario lo que debe saber es la secuencia con que va llamando a las diferentes funciones, qué datos requieren y qué resultados se obtienen.

En resumen, al resolver una estructura o realizar el análisis sísmico de una estructura con **CEINCI-LAB**, se crea un nuevo programa, en el cual es necesario ingresar datos de la estructura y luego se empieza a llamar a las funciones para que resuelvan el problema, es similar a un lego en que se tienen las piezas y se las van uniendo para llegar a una figura dada.

Como las funciones son de código abierto, el usuario puede ver cada una de las sentencias y de esa forma complementa su formación académica, que fue el objetivo principal del autor de este artículo en sus clases dictadas en diferentes universidades de América del Sur, pero principalmente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE donde empezó a laborar en 1982 y en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM desde el 2016.

Importantes contribuciones han desarrollado sus estudiantes de pregrado y postgrado, para que sea un sistema de computación muy poderoso y no solamente sirva para la parte académica, sino también que se lo puede utilizar en consultorías, sin perder de vista que se resuelve paso a paso. Es muy larga la lista de estudiantes e investigadores que han aportado, a partir del 2014 al sistema de computación **CEINCI-LAB** en representación de todos ellos solo cito a Brian Cagua.

En: <https://ceincilab.wordpress.com> se tiene el blog de **CEINCI-LAB** en el que aparecen los investigadores principales que han aportado al desarrollo de las funciones; se puede observar videos de las clases que el autor de este artículo elaboró durante la pandemia del corona virus, para poder dictar sus clases en forma virtual; se cuenta con información de los cursos que se dictan mensualmente; de las conferencias que se imparten los días lunes a las 19h00 por destacados profesionales de Norte y Sur América, ahí se podrá encontrar los videos de las conferencias dictadas, siempre que el expositor lo permita. En fin, hay una gran cantidad de información de mucha utilidad.

En el siguiente apartado se presenta cómo ha evolucionado **CEINCI-LAB** en la generación de la geometría de una estructura y se describen muy rápidamente las funciones que se utilizan. La descripción se la realiza utilizando el ex parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM, que fue afectada por el terremoto de Pedernales de 2016 ($M=7.8$), el cual se presenta en la figura 1. En el sentido longitudinal los pórticos están formados por vigas rectas (fotografía superior) y en el sentido transversal por vigas inclinadas y es más hay pórticos que no son continuos (fotografía inferior).



Figura 1 Ex parqueadero de la ULEAM; a) Fachada Frontal; b) Fachada Lateral Izquierda.

2. GENERACIÓN DE LA ESTRUCTURA SIN REFORZAR

Una de las fortalezas de **CEINCI-LAB** es la generación muy fácil de la geometría de una estructura, a diferencia de otros programas donde el ingreso de datos es muy laborioso.

En la figura 2, se presenta la estructura original del ex parqueadero (antes de ser reforzada) la misma que está compuesta por columnas de 40/55 cm, las exteriores y 40/65 cm, las interiores; las vigas son de 40/80 cm. Es decir, fue diseñada con el criterio de viga fuerte, columna débil contrario a la filosofía de diseño sísmico, pero lo que se quiere ilustrar es cómo se generan los pórticos al usar las funciones de **CEINCI-LAB** y para ello en la figura 3 se indica el pórtico A que es igual al G, éste se lo va a generar de 3 formas: i) utilizando los programas iniciales de **CEINCI-LAB**, porque vale la pena tener una reseña histórica de la evolución de este sistema de computación; ii) generando con pocos datos de entrada la geometría, considerando a la viga un solo elemento; iii) generando con pocos datos de entrada, considerando un nudo en la mitad de las vigas.

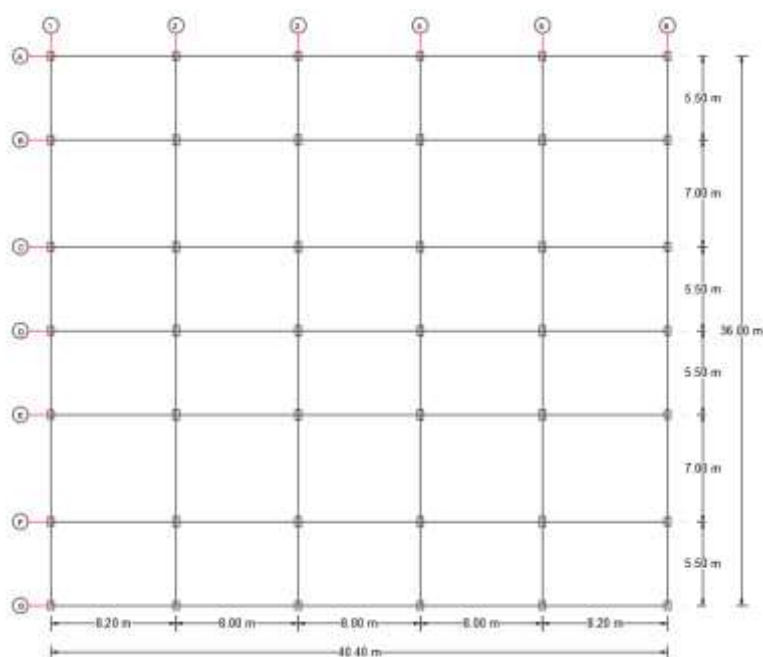


Figura 2 Vista en planta del ex parqueadero de la ULEAM y se indican los pórticos que se van a generar con **CEINCI-LAB**.

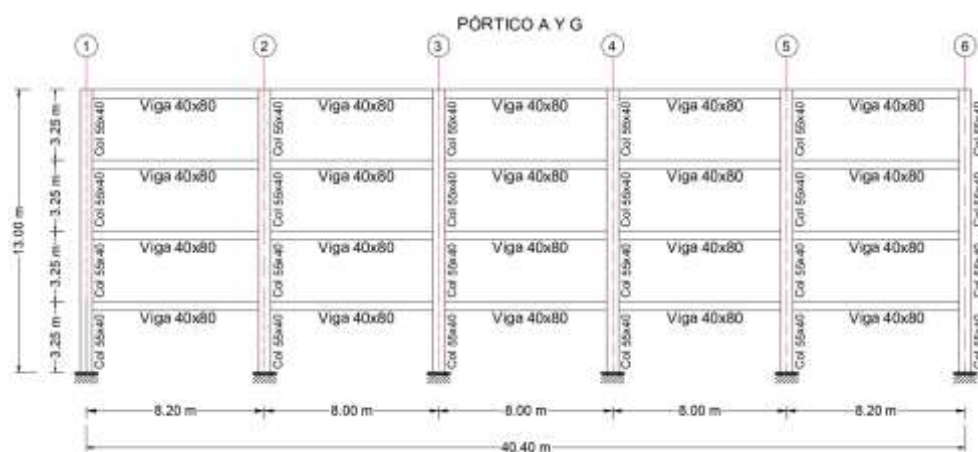


Figura 3 Geometría del Pórtico A y G que se va a generar con **CEINCI-LAB**

2.1 PROGRAMAS INICIALES DE **CEINCI-LAB**

El usuario antes de generar la estructura, con los primeros programas de **CEINCI-LAB** debe dibujar el pórtico y numerar los nudos y elementos. Esto es bueno para aprender más, pero demanda más tiempo al Proyectista Estructural. En estructuras muy irregulares no hay otra opción que numerar todos los nudos y elementos.

La matriz denominada *Nudos* (se puede dar cualquier nombre) contiene información para generar las coordenadas X,Y de los nudos de la estructura; en cada fila se tiene 7 datos, el primero identifica al nudo; los dos siguientes son las coordenadas del nudo en sentido X y en sentido Y; el cuarto dato es el número de nudos que se van a generar siempre que se tengan distancias iguales (en este caso se generan hacia arriba debido a que las alturas de los pisos son de 3.25 m); el quinto dato es el incremento de la numeración de los nudos que se van a generar; el sexto dato es el incremento de la distancia de los nudos en sentido X; y el séptimo el incremento de la distancia de los nudos en sentido Y.

La matriz Gen (puede darse cualquier nombre) contiene información sobre el nudo inicial y final de cada elemento; contiene 7 datos por cada fila; el primero corresponde al número del elemento; el segundo al nudo inicial; el tercero al nudo final; el cuarto al número de elementos que se van a generar; el quinto al incremento de la numeración de los elementos; el sexto al incremento de la numeración del nudo inicial y el séptimo al incremento de la numeración en el nudo final.

A continuación, se indican los datos para generar el Pórtico A y las funciones que se utilizan son: ***glinea_portico*** que genera las coordenadas X,Y de los nudos y ***gn_portico*** que genera dos vectores que contienen los nudos iniciales NI, y los nudos finales NJ. Estos datos se hallan en el programa denominado ***Ej_art_porticoA***; en la figura 4 se presenta la geometría del pórtico, con la numeración de nudos y elementos utilizando la función ***dibujoplano***

```
Nudos=[1 0.0 0.0 4 6 0.0 3.25;2 8.2 0.0 4 6 0.0 3.25;
        3 16.20 0.0 4 6 0.0 3.25; 4 24.2 0.0 4 6 0.0 3.25;
        5 32.20 0.0 4 6 0.0 3.25; 6 40.40 0.0 4 6 0.0 3.25]
```

```
Gen=[1 1 7 23 1 1 1; 25 7 8 4 1 1 1; 30 13 14 4 1 1 1;
      35 19 20 4 1 1 1; 40 25 26 4 1 1 1];
```

```
[X,Y]=glinea_portico(Nudos);
[NI,NJ]=gn_portico(Gen)
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
```

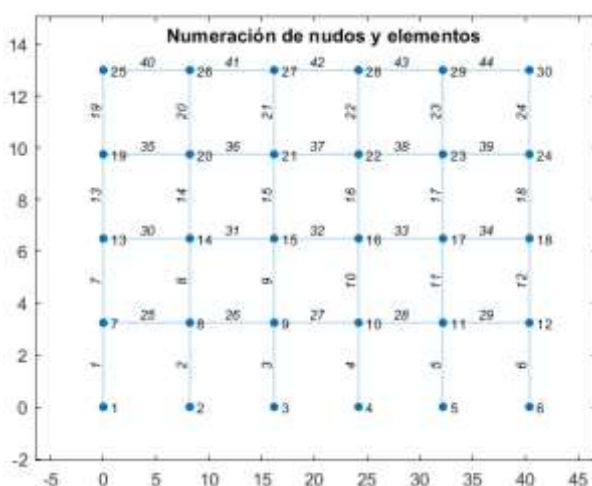


Figura 4 Numeración de nudos y elementos del Pórtico A.

2.2 ESTRUCTURAS REGULARES EN ELEVACIÓN SIN CONSIDERAR NUDO EN LA MITAD DE LA VIGA.

En este caso no se requiere dibujar el pórtico, numerar los nudos y elementos para encontrar la geometría de la estructura, es aplicable a estructuras regulares en elevación. Para generar el pórtico de la figura 4, las sentencias del programa que se ha denominado: *Ej_art_porticoA_1*, son:

```
sv=[8.2;8.0;8.0;8.0;8.2]; % Luces de vanos
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; % Alturas de pisos
z=0; % No hay desnivel en el Pórtico
mar_desn=[1]; % Número de vano con desnivel se pone cualquier valor
nvramp=0; % Número de vanos donde se tiene viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvg,nudt,nod,nr,ngl]=geometria_desn_1a(sv,sp);
[X,Y]=glinea_desn_1a(np,sv,sp,nod,nr,mar_desn,z,nvramp);
[NI,NJ]=gn_portico_desn_1a(nr,nv,nudt,nudcol,nudvg);
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
```

El vector **sv** contiene las luces de los vanos (ver figura 3); el vector **sp** contiene la altura de cada piso. Las funciones que se van a utilizar para definir las coordenadas de los nudos X, Y; como también para determinar los nudos iniciales y finales de la estructura NI, NJ, fueron realizadas para pórticos con vigas inclinadas, pero se las puede adaptar a pórticos con vigas rectas colocando $z=0$, que significa que no hay desnivel en el pórtico; además de eso se debe identificar un número de vano donde se inicia el desnivel, como el pórtico no tiene desniveles se puede colocar cualquier vano. Posteriormente se hablará sobre estas funciones que terminan en *desn_1a*

2.3 ESTRUCTURAS REGULARES EN ELEVACIÓN CON NUDO EN LA MITAD DE LA VIGA.

Si se desea reforzar el pórtico A, con diagonales de acero en forma de “V” invertida o con disipadores de energía TADAS, colocados sobre diagonales de

acero concéntricas, se tiene que considerar un nudo en la mitad de las vigas. Por lo tanto, el modelo de análisis indicado en la figura 4, no sirve para este propósito.

Para el reforzamiento se necesita considerar un nudo en la mitad de las vigas, pero no solo eso, aunque no se refuerce al tener un nudo en la mitad se visualizan de mejor manera los resultados (Aguiar *et al.* 2019). Las sentencias del programa denominado **Ej_art_porticoA_2** son las siguientes.

```
sv=[8.2;8.0;8.0;8.0;8.2]; % Luces de vanos
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; % Alturas de pisos
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[Ni,Nj]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
dibujoplano(X,Y,Ni,Nj)
```

Los datos de las variables **sv**, **sp** han sido ya indicados. Se requieren tres funciones para generar la geometría del pórtico; la primera **geometría_nudo_viga**, que genera datos de la estructura como el número de vanos **nv**, el número de pisos **np**, el número total de elementos **nudt**; el número total de columnas **nudcol**, el número total de vigas **nudvig**, el número de nudos **nod**, el número de nudos restringidos **nr**.

El segundo programa **glinea_portico2** determina las coordenadas de los nudos X,Y; finalmente el programa **gn_portico2** encuentra los vectores con los nudos iniciales y finales Ni, Nj. Nótese que se mantiene la nomenclatura de las funciones iniciales, pero al final se agrega el 2, que es para generar un nudo intermedio.

Estas tres funciones fueron desarrolladas por Cagua y Pilatasig (2019, 1) y han servido para que otros estudiantes-investigadores las adapten a otros casos de estudio como el que se verá en el siguiente apartado. Pero antes en la figura 5, se presenta la geometría de la estructura con nudo intermedio en las vigas.

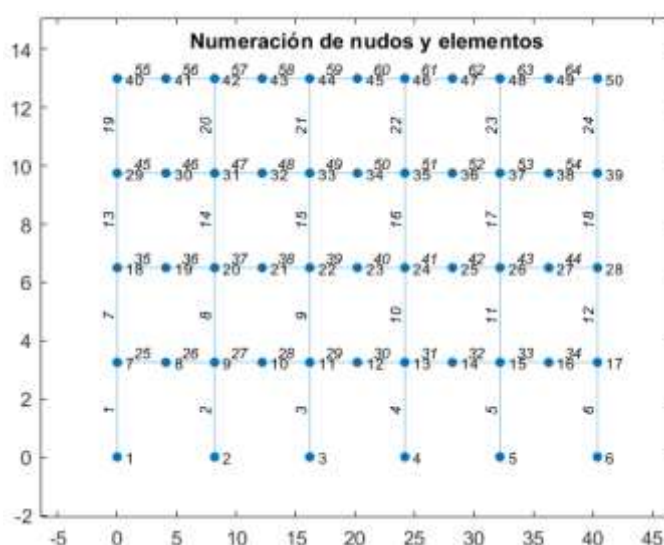


Figura 5 Generación de Pórtico A, considerando nudo en la mitad de las vigas.

2.4 GENERACIÓN DE PÓRTICOS CON VIGAS INCLINADAS

En la figura 6 se presenta la estructura del ex parqueadero de la ULEAM, sin reforzamiento, es así como resistió el terremoto de 2016 ($M=7.8$) con daño en columnas; al mirar la figura 6 se ve que los pórticos en sentido longitudinal identificados por letras en la figura 2 tienen vigas rectas y son similares al pórtico A, lo que cambia son las dimensiones de las columnas.

Ahora, en el sentido transversal (pórticos identificados con números, en la figura 2) los pórticos tienen vigas inclinadas, uno de ellos es el Pórtico 5 que es igual al Pórtico 6 y se muestra en la figura 7. Para generar la geometría de este pórtico se tienen las funciones: **geometría_desn_1a**; **gn_portico_desn_1a**; **glinea_desn_1a**, que fueron utilizadas para generar el Pórtico A, sin considerar nudo intermedio en las vigas.



Figura 6 Vista espacial de la estructura del ex parqueadero de la ULEAM, antes de ser reforzado. En la abertura se tenía una grada.

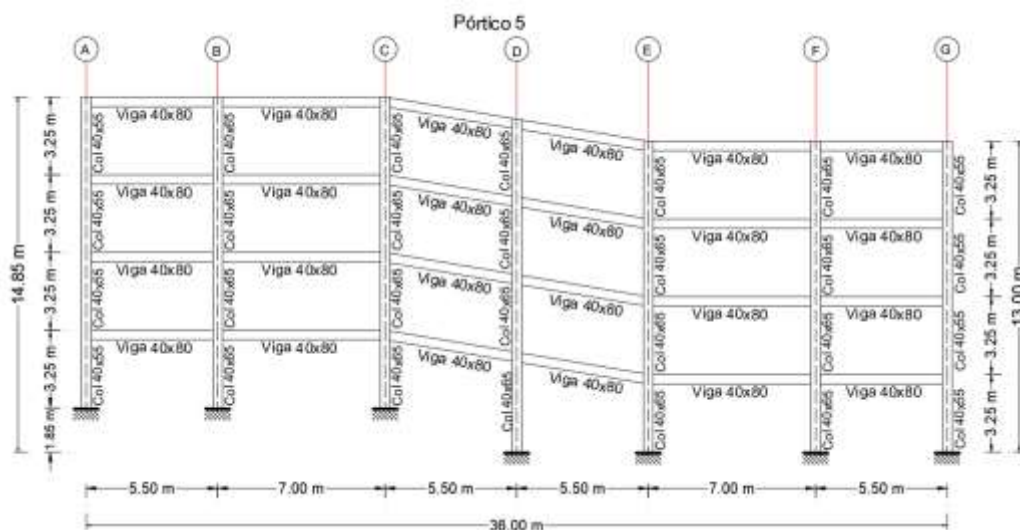


Figura 7 Geometría del Pórtico 5 con vigas inclinadas en la rampa del ex parqueadero.

El programa con el cual se obtiene la geometría del Pórtico 5, se denomina: **Ej_art_portico5** y se lista a continuación.

```
sv=[5.5;7;5.5;5.5;7;5.5]; %Distancia de los vanos [m]
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Altura de piso [m]
z=1.85; %cota o altura de desnivel [m]
mar_desn=[3]; %Vano donde empieza el desnivel
nvramp=2; %Número de vanos con viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvg,nudt,nod,nr,ngl]=geometria_desn_1a(sv,sp);
[NI,NJ]=gn_portico_desn_1a(nr,nv,nudt,nudcol,nudvg);
[X,Y]=glinea_desn_1a(np,sv,sp,nod,nr,mar_desn,z,nvramp);
[CG]=cg_desn(nr,np,nv,nod);
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
%dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
```

El contenido de las variables **sv**, **sp**, ha sido ya indicado. Ahora resta por indicar que **z** es la diferencia de altura entre el extremo izquierdo y el extremo derecho del pórtico; **mar_desn** indica el número del vano en que empieza la viga inclinada; **nvramp** es el número de vanos que tienen la viga inclinada. En la figura 8 se presenta la geometría del Pórtico 5 con numeración de nudos y vigas, sin considerar nudo en la mitad de la viga.

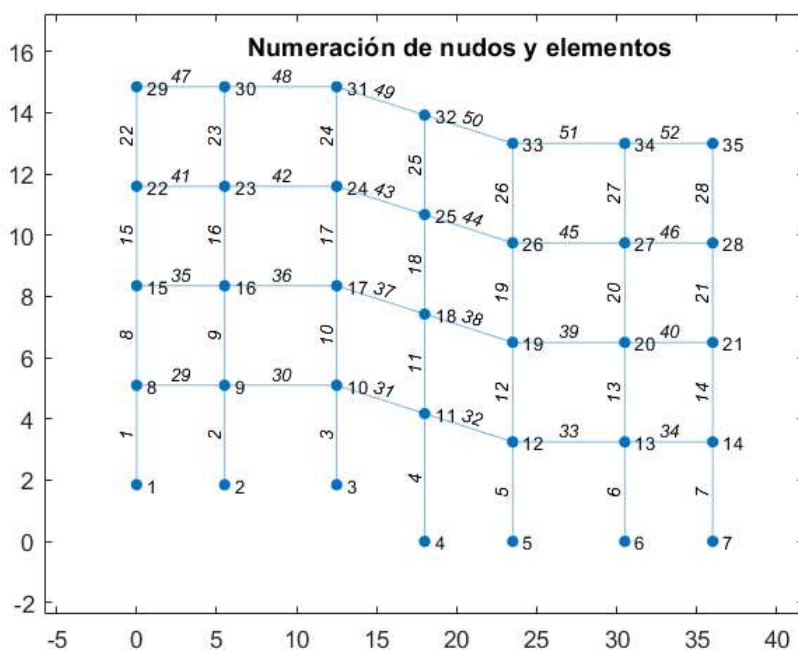


Figura 8 Geometría con numeración de nudos y elementos del Pórtico 5, no se considera nudo en la mitad de la viga.

Para cuando se desea considerar nudo en la mitad de la viga, las funciones que deben emplearse son: **geometria_desn_2a**; **gn_portico_desn_2a**; **glinea_desn_2a**. (Velásquez, 2021) En la figura 9, se presenta el pórtico considerando un nudo en la mitad de la viga.

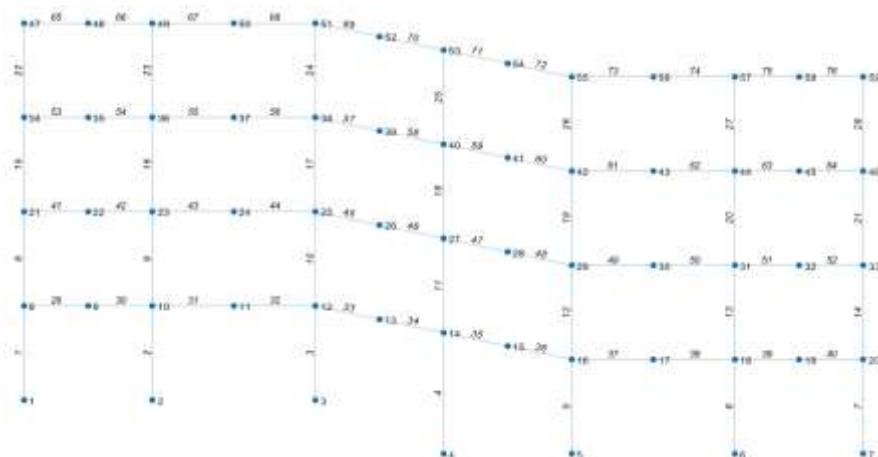


Figura 9 Geometría del Pórtico 5, considerando nudo en la mitad de la viga.

El programa que genera el Pórtico 5, considerando nudo en la mitad de la viga se denomina **Ej_art_portico5_1** y se lista a continuación. Pero antes se destaca que el programa que determina los grados de libertad se llama **cg_desn_2**; en la figura 10 se presentan los respectivos grados de libertad.

```
sv=[5.5;7;5.5;5.5;7;5.5]; %Distancia de los vanos [m]
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Altura de piso [m]
z=1.85; %cota o altura de desnivel [m]
mar_desn=[3]; %Vano donde empieza el desnivel
nv ramp=2; %Número de vanos con viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvg,nudt,nod,nr,ngl]=geometria_desn_2a(sv,sp);
[Ni,Nj]=gn_portico_desn_2a(nr,nv,nudt,nudcol,nudvg);
[X,Y]=glinea_desn_2a(nv,np,sv,sp,nod,nr,z,mar_desn,nv ramp);
[CG]=cg_desn_2(nr,np,nv,nod);
dibujoplano(X,Y,Ni,Nj)
%dibujogdl(X,Y,Ni,Nj,CG)
```

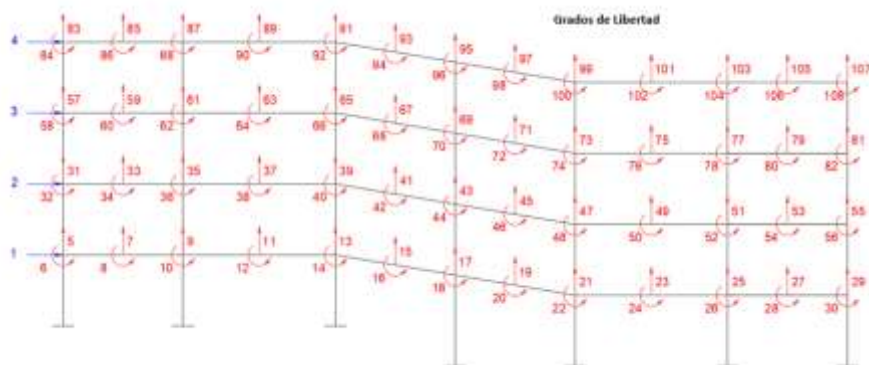


Figura 10 Grados de libertad para el análisis sísmico del Pórtico 5.

El pórtico indicado en la parte superior de la figura 11 no corresponde al parqueadero de la ULEAM, sin embargo, se lo presenta ya que se quiere ilustrar como se debe proceder cuando solo se tiene un vano con viga inclinada (se puede tener más vanos inclinados), se desea modelar considerando nudo en la mitad de la viga, la altura de los entrepisos es 3.25 m, y el desnivel es de 1.50 m. En la parte inferior de la figura 11 se muestra el pórtico generado con el programa denominado **Ej_art_viga_inclinada** cuyas sentencias se indican a continuación.

```
sv=[5.5;7;6.0;7;5.5]; %Distancia de los vanos [m]
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Altura de piso [m]
z=-1.50; %cota o altura de desnivel [m]
mar_desn=[3]; %Vano donde empieza el desnivel
nvramp=1; %Número de vanos con viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvng,nudt,nod,nr,ngl]=geometria_desn_2a(sv,sp);
[Ni,Nj]=gn_portico_desn_2a(nr,nv,nudt,nudcol,nudvg);
[X,Y]=glinea_desn_2a(nv,np,sv,sp,nod,nr,z,mar_desn,nvramp);
[CG]=cg_desn_2(nr,np,nv,nod);
dibujoplano(X,Y,Ni,Nj)
%dibujogdl(X,Y,Ni,Nj,CG)
```

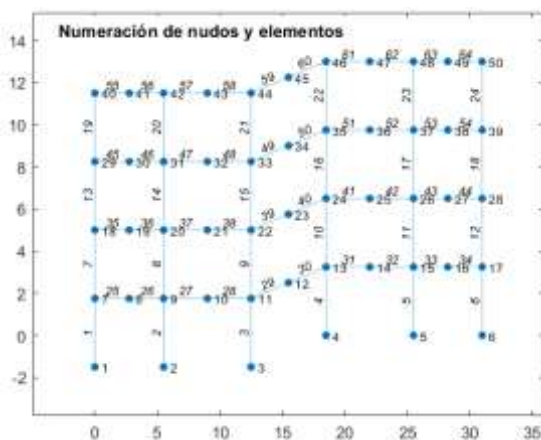
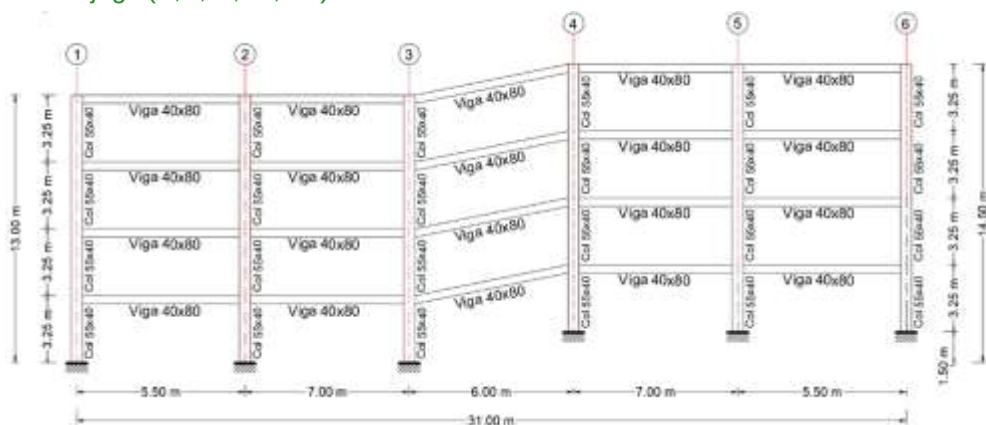


Figura 11 En la parte superior, geometría del pórtico a generar; en la parte inferior numeración de nudos y elementos, considerando nudo en la mitad de la viga.

2.5 GENERACIÓN DE PÓRTICOS IRREGULARES

Estrictamente el pórtico indicado en la parte superior de la figura 12, no es el modelo de cálculo del Pórtico 3, del parqueadero de la ULEAM, pero se quiere ver cómo se genera ese marco con las funciones de **CEINCI-LAB**, las columnas exteriores son de 40/55 cm, las interiores de 40/65 cm, las vigas de 40/80 cm. Para generar la geometría se consideran como si fueran dos bloques regulares que están indicados en la parte central de la figura 12 y se dan los datos de cada bloque como si se tratara de un pórtico regular en elevación. Cagua y Pilatasig (2019, 2); Aguiar (2020). En la parte inferior se muestra el pórtico generado.

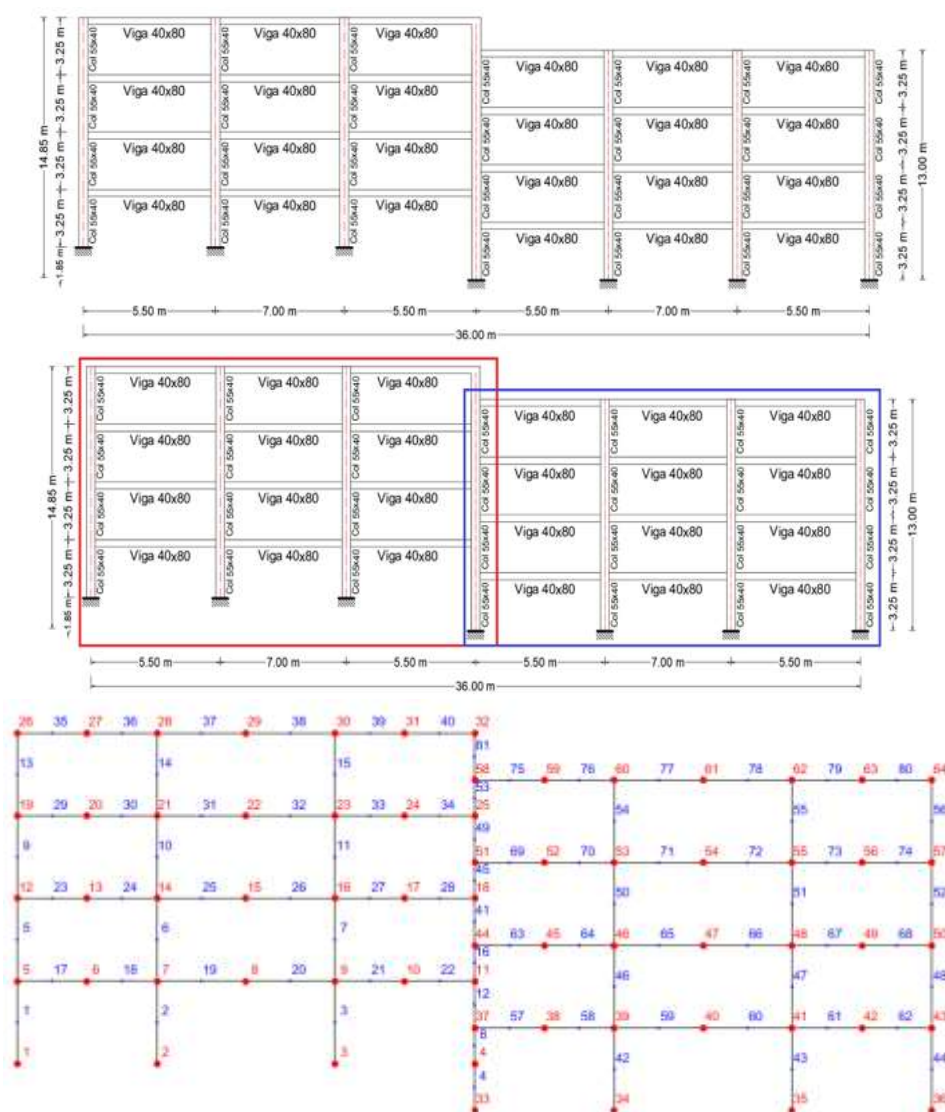


Figura 12 Modelo aproximado de Pórtico 3 de parqueadero de ULEAM; en la parte central descripción de los bloques que se consideran y en la parte inferior estructura generada.

Las sentencias del programa: **Ej_art_portico3_aprox** con el cual se encuentra el modelo numérico indicado en la parte inferior de la figura 12, se indican a continuación.

```
sv1=[5.5;7;5.5]; % Ingresar luces de los vanos
sp1=[3.25,3.25,3.25,3.25]; % Ingresar un vector con la altura de pisos en metros
Xo1=0; Yo1=1.85; % Coordenadas para desfase del bloque 1 (Punto de union)
% Bloque 2 (para la generación es el derecho)
% Ingresar un vector con la longitud de vanos en metros
sv2=[5.5,7,5.5]; % Ingresar luces de los vanos
sp2=[3.25,3.25,3.25,3.25]; % Ingresar un vector con la altura de pisos en metros
Xo2=18; Yo2=0.0; % Coordenadas para desfase del bloque 1 (Punto de union)
sp=[sp1;sp2];
Xdesnivel=[Xo2]; % Coordenadas X para desfase como vector
%% Combinación de vectores de cada bloque que conforma la estructura
Num_Comb=2; %Indicar el número de bloques en los que se descompuso la
estructura
[svF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sv1,sv2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[spF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sp1,sp2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[XoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Xo1,Xo2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[YoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Yo1,Yo2,0,0,0,0,0,0,0,0);
%% Geometría de la estructura en 2D
[nr,nod,np,nELEM,X,Y,NI,NJ]=geom_2D_Irreg_desnivel(Num_Comb,svF,spF,XoF,
YoF,Xdesnivel);
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
```

Se dan los vectores **sv**, **sp**, de cada uno de los bloques estructurales mostrados en la parte central de la figura 12 y luego se debe indicar las coordenadas de un punto de cada bloque (**Xo,Yo**) Se puede trabajar hasta con 10 bloques; en este ejemplo solo se tienen 2 bloques.

Nótese en la parte inferior de la figura 12 que se numeran primero todos los nudos y elementos del bloque izquierdo y luego se continua con la numeración de nudos y elementos del bloque derecho. En el eje central, se numeran primero los elementos 4, 8, 12, 16, que corresponden a la numeración de los elementos del bloque izquierdo, pero ahora son elementos cortos; luego en el mismo eje se numeran los elementos 41, 45, 49, 53, que son elementos cortos y al final se tiene el elemento 81 que es el último elemento. Todo esto hace el programa denominado: **geom_2D_Irreg_desnivel**, para esto se debe identificar el eje de columna especial mediante la variable **Xdesnivel**.

Ahora bien, en la parte superior de la figura 13, se presenta la verdadera geometría del Pórtico 3, que es igual a la del 4, del parqueadero de la ULEAM; a partir de la geometría indicada en la parte inferior de la figura 12, se obtiene muy fácilmente este modelo numérico, modificando las coordenadas en Y, de los nudos 31 y 32, que se los debe bajar y de los nudos 58 y 59 que se los debe subir, para el efecto en el dibujo se debe medir exactamente las coordenadas en Y de estos nudos y se halla el pórtico mostrado en la parte inferior de la figura 13.

A continuación, se indica únicamente la parte en la cual se han colocado las nuevas coordenadas de los nudos 31, 32, 58 y 59; para tener referencia se indica

la función **geom_2D_Irreg_desnivel** El programa que contiene todas las sentencias para dibujar el pórtico mostrado en la parte inferior de la figura 13, se llama: **Ej_art_portico3**

%% Geometría de la estructura en 2D

```
[nr,nod,np,nELEM,X,Y,NI,NJ]=geom_2D_Irreg_desnivel(Num_Comb,svF,spF,XoF,YoF);
```

```
Y(31)=14.3875; Y(32)=13.925;
```

```
Y(58)=13.925; Y(59)=13.4625;
```

```
dibujoplano(X,Y,NI,NJ), title('Pórtico 4')
```

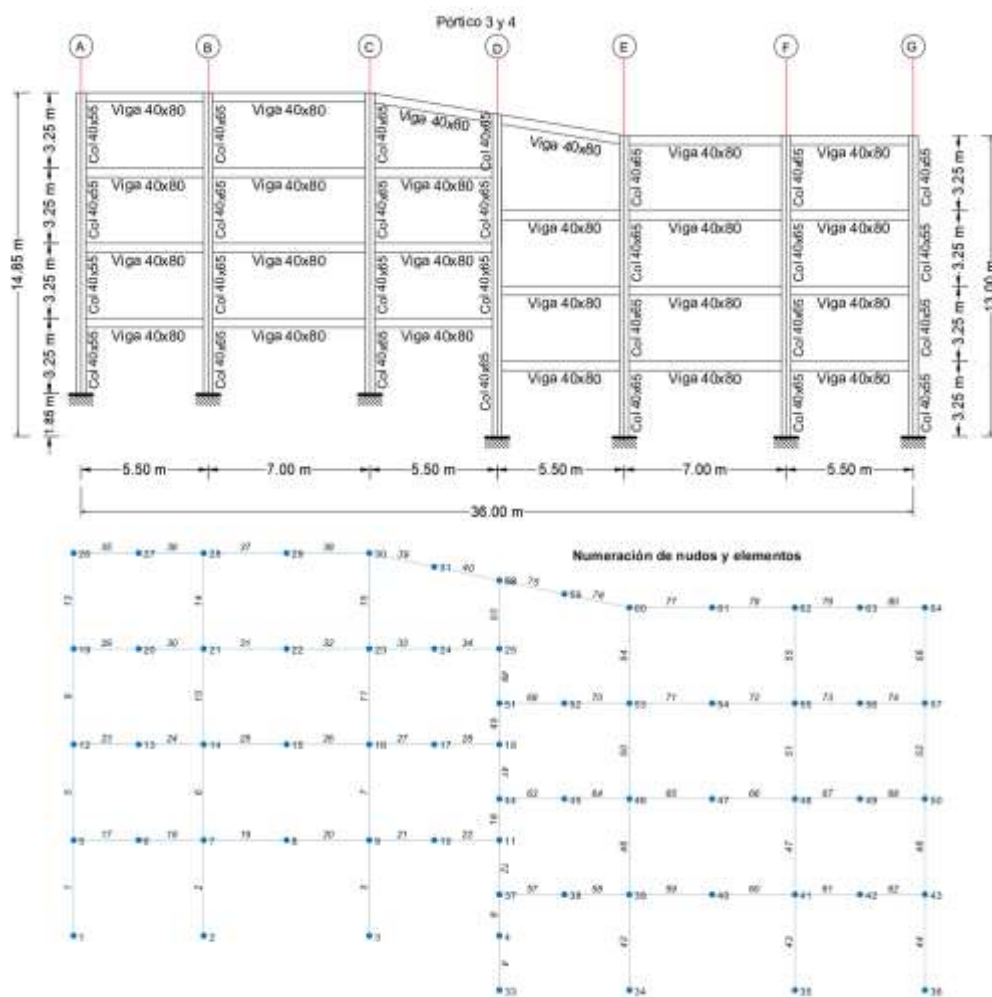


Figura 13 Geometría real del Pórtico 3, en la parte superior y modelo numérico generado con programa. **Ej_art_portico3**.

2.6 PÓRTICOS ESPECIALES EN PARQUEADEROS

En la parte superior de la figura 14, se presenta el Pórtico 1, que se lo ha denominado “especial” debido a que es muy irregular, en el último piso del eje D se

tiene una columna esbelta y presentó daño en el terremoto de 2016. Por ahora, el objetivo es dibujar la geometría del Pórtico 1, con las nuevas funciones de **CEINCI-LAB** desarrolladas por Velásquez (2021), sin considerar nudo intermedio en la viga; a continuación, se presenta el programa desarrollado que se ha denominado **Ej_art_portico1**; en la parte inferior de la figura 14 se muestra la numeración de nudos y elementos y en la figura 15, los grados de libertad.

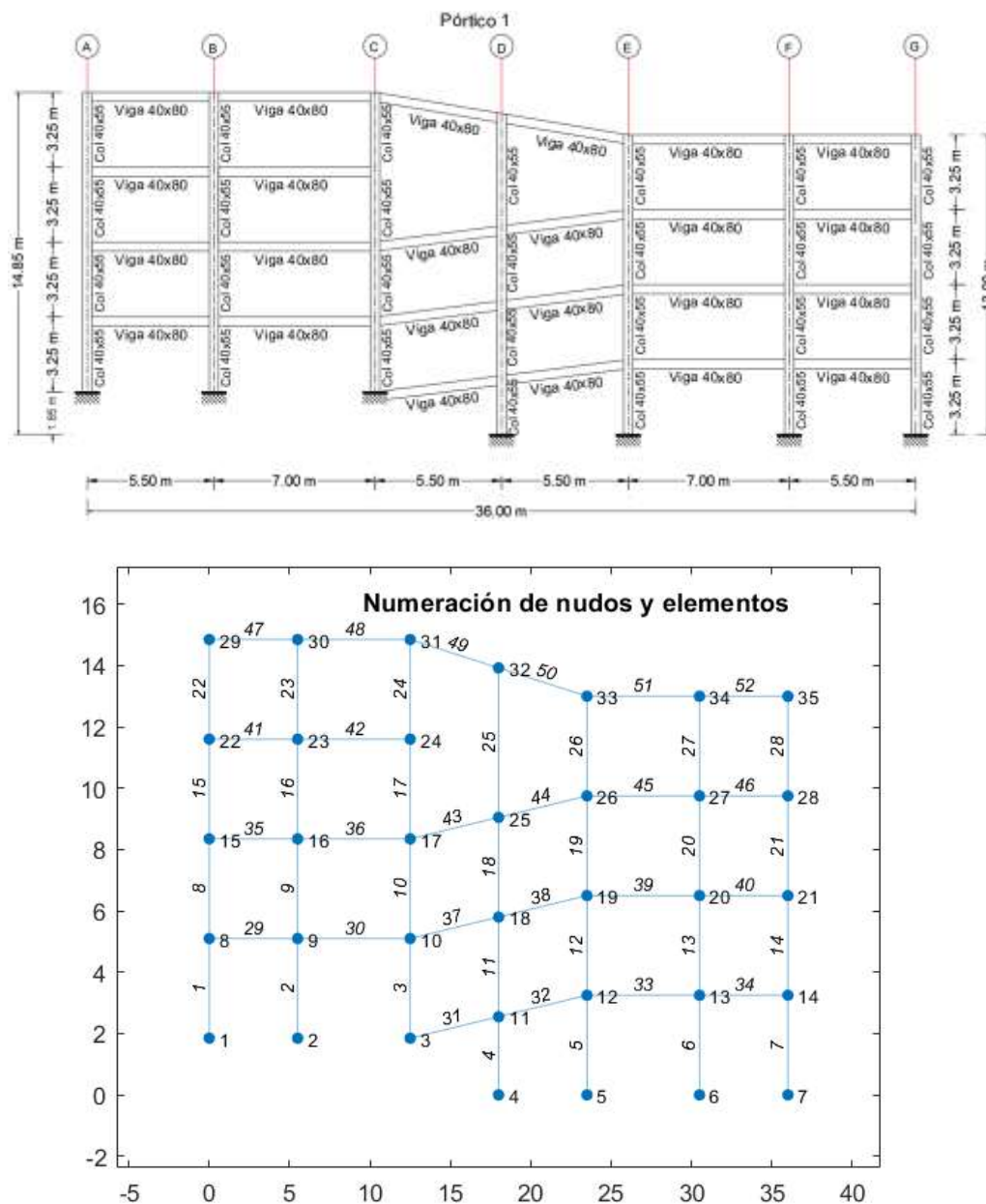


Figura 14 Pórtico 1, irregular en elevación, en la parte inferior se presenta la numeración de nudos y elementos.

sv=[5.5;7;5.5;5.5;7;5.5]; %Distancia de los vanos [m]

```

sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Altura de piso [m]
z=1.85; %cota de desnivel [m]
mar_desn=[3]; %Vano donde empieza el desnivel
nvramp=2; %Número de vanos con viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvg,nudt,nod,nr,ngl]=geometria_desn_1b(sv,sp);
[Nl,NJ]=gn_portico_desn_1b(nr,nv,nudt,nudcol,nudvg,mar_desn,np);
[X,Y]=glinea_desn_1b(np,sv,sp,nod,nr,mar_desn,z,nvramp);
[CG]=cg_desn_1(nr,np,nv,nod);
%dibujoplano(X,Y,Nl,NJ)
dibujogdl(X,Y,Nl,NJ,CG)

```

La variable **mar_desn** indica el vano en que empieza la viga inclinada; y la variable **nvramp** es el número de vanos con vigas inclinadas. Estas variables son muy importantes ya que permiten encontrar la geometría de otros pórticos similares al de la figura 14.

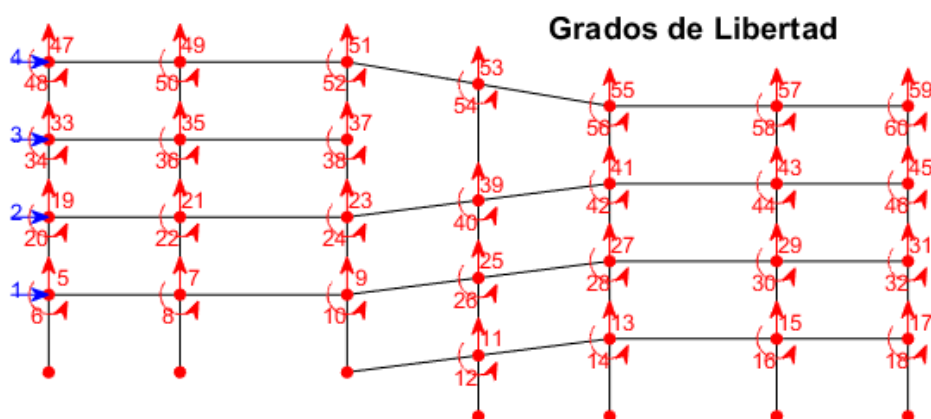


Figura 15 Grados de libertad del Pórtico 1, sin considerar nudo intermedio en vigas.

Ahora si se desea considerar un nudo en la mitad de la viga se deben utilizar las funciones: **geometría_desn_2b**; **gn_portico_desn_2b**; **glinea_desn_2b**; **cg_desn_2**.

En la parte superior de la figura 16, se presenta la geometría del Pórtico 1, considerando un nudo intermedio en la mitad de la viga y en la parte inferior se muestran los grados de libertad, para el análisis sísmico. El programa que hace todo esto se denomina: **Ej_art_portico1_1**, las sentencias de este programa se indican a continuación.

```

sv=[5.5;7;5.5;5.5;7;5.5]; %Distancia de los vanos [m]
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Altura de piso [m]
z=1.85; %cota de desnivel [m]
mar_desn=[3]; %Vano donde empieza el desnivel
nvramp=2; %Número de vanos con viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvg,nudt,nod,nr,ngl]=380eometría_desn_2b(sv,sp);
[Nl,NJ]=gn_portico_desn_2b(nr,nv,np,nudt,nudcol,nudvg,mar_desn);
[X,Y]=glinea_desn_2b(nv,np,sv,sp,nod,nr,mar_desn,z,nvramp);
[CG]=cg_desn_2(nr,np,nv,nod);
%dibujoplano(X,Y,Nl,NJ)
dibujogdl(X,Y,Nl,NJ,CG)

```

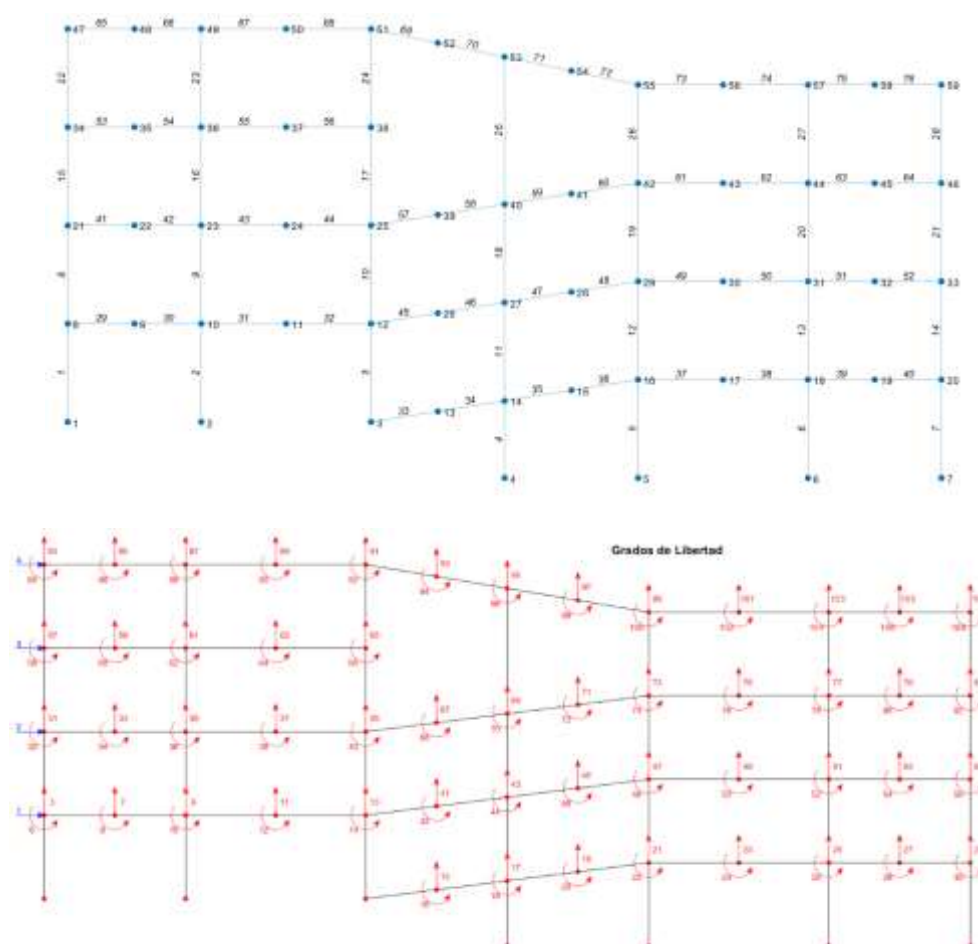


Figura 16 Pórtico 1, considerando nudo en la mitad de la viga; en la parte superior se presenta la numeración de nudos y elementos; en la parte inferior los grados de libertad para encontrar la matriz de rigidez lateral.

3. DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA DURANTE EL TERREMOTO DE 2016

En este apartado se dan recomendaciones de cómo proceder a reforzar una estructura que ha sido afectada por un sismo; sobre las columnas cortas que se crean en los pórticos exteriores del parqueadero, de cómo evitar una mala estructuración para evitar daños y la forma cómo se reforzó la estructura.

3.1 ¿FISURAS SON SOLO SUPERFICIALES?

En algunas ocasiones puede pasar que cuando uno va a inspeccionar una estructura afectada por un sismo y encuentra una columna como la mostrada en la figura 17, se indique que las fisuras son superficiales a nivel de enlucido y no se le da más importancia; después se procede a empastar la falla y pintar la columna. Todo esto porque las fisuras se las ve que tienen un ancho menor a los 2 mm,

aunque en algunos sitios tiene un ancho entre 5 y 8 mm; en estas condiciones en el próximo terremoto esta columna y toda la estructura sufrirá gran daño.

Cuando se empezó con el trabajo de reparación de la columna indicada en la figura 17, en primer lugar, llamó la atención la gran cantidad de tubos de plástico que se colocaron para en esos sitios colocar la resina epoxi, las fotografías que se muestran en la parte superior corresponden a la vista exterior e interior de la columna. Se destaca que con un taladro se perforan los sitios donde se colocan los tubos de plásticos (mangueras).

El trabajo consiste primero en agrandar la cabeza de las fisuras (estos elementos no estaban enlucidos, se sacó la pintura con equipo de abrasión para identificar mejor las fisuras), se limpian los bordes con agua, se colocan los tubos y una pasta a lo largo de las fisuras para evitar que la resina se salga.

La fotografía inferior izquierda de la figura 18, muestra la colocación de la resina epoxi, desde la parte interior del parqueadero, lo preocupante fue que la resina atravesó todo el ancho de la columna (40 cm) para salir por el otro lado de la columna y en la figura inferior derecha se ve a los operarios colocar los alambres con los cuales amarraron y sellaron los tubos.



Figura 17 Estado en que quedó la columna F6 en planta baja después del terremoto del 16 de abril de 2016 (M=7.8)

Esto de que se colocó resina epoxi por una de las caras de la columna y salió por el otro lado o por una de las caras adyacentes fue bastante común en los dos primeros pisos del parqueadero.

¿Qué significó esto? Que las fisuras presentadas en columnas tenían más daño de lo que aparentemente se observaba. En base a esta experiencia se recomienda no confiarse y decir que las fisuras son solo superficiales, la otra experiencia es qué si se va a reforzar una estructura de hormigón armado, aunque parezca que no hay daño en los elementos estructurales, debe existir el rubro de colocación de resina epoxi, sobre todo si se trata de una estructura del sector público en que no es fácil incorporar un nuevo rubro.



Figura 18 Colocación de resina epoxi en la columna F6, en planta baja. Las fotografías superiores muestran los tubos en los sitios que se van a realizar las inyecciones que se muestran en las fotografías inferiores.

3.2 EFECTO DE COLUMNA CORTA EN PÓRTICOS PERIMETRALES

En las fotografías de la figura 1 se observa que en el perímetro del parqueadero existen antepechos que crean el problema de *columna corta*. Normalmente en las columnas el daño se genera en los extremos, ahora si en uno de los extremos se tiene mampostería acoplada a la estructura, ver figura 19, esa zona pasa a ser muy rígida y el daño pasa a la parte central en donde se han generado una gran cantidad de fisuras inclinadas.

El mayor daño de *columna corta* se dio en la intersección de los ejes A y G con los ejes 1 y 5.



Figura 19 Efecto de *columna corta* en columna G5 de planta baja. Fuente: Del Castillo D., (2018)

Al inyectar con resina epoxi, los sitios en que llega el fluido a presión adquieren una gran resistencia a la compresión cuando se seca, en algunos casos puede ser suficiente, pero en otros no. En el ex parqueadero después de la colocación de la resina se encamisó con fibra de carbono, Sika Wrap 600, con esto se confina a la columna y se incrementa la resistencia del hormigón.

Antes de colocar la fibra se debe hacer el redondeo de las esquinas de la columna para que no vaya a romperse la fibra durante su colocación, de igual manera se debe preparar la superficie donde se va a colocar, para que se encuentra completamente lisa y de esta forma evitar la rotura de la fibra.

En la parte izquierda de la figura 20, se aprecia que la fibra se ha cortado en una longitud de 3 m, y se está colocando el material imprimante con un rodillo, luego se coloca la fibra en la columna, dejando 10 cm, de traslape tanto en el sentido vertical como en el sentido horizontal, se utiliza una varilla para que no queden ondulaciones. Una vez colocada se vuelve a colocar imprimante, de tal manera que el FRP quede encapsulado.

Por cierto, cuando se pide las propiedades de la fibra debe indicar que le den del material encapsulado, sus valores son menores (Módulo de Elasticidad) son menores al de la fibra no curada, para el diseño se trabaja con fibra encapsulada.

En la parte inferior de la figura 20, se observa la colocación de imprimante sobre la fibra. Con una capa de fibra se eleva la resistencia a la compresión del hormigón alrededor del 10 al 15% de la resistencia nominal; si se colocan dos capas de fibra no se piense que se incrementa la resistencia en el doble, no es lineal, se incrementa un poco más. La gran ventaja de reforzar con FRP es que el trabajo es rápido, limpio, no se incrementan las dimensiones del elemento estructural y el peso prácticamente es el mismo. La desventaja es el costo.



Figura 20 Confinamiento de una columna con fibra de carbono; en la parte superior izquierda se ve la colocación del imprimante; a la derecha se observa la colocación con un traslape vertical de 10 cm; en la fotografía inferior se ve la colocación de imprimante, para que la fibra quede encapsulada.

En la figura 21 se observa la colocación de grano de mármol, en la columna reforzada con fibra de carbono, que se ha venido analizando y que se encuentra en uno de los ingresos al ex parqueadero de la ULEAM. El grano de mármol (es como arena) se lanza a la columna y tiene por finalidad hacer una capa de rugosidad adherente para empaste o enlucido posterior con la finalidad de proteger de los rayos ultravioletas que pueden dañar al FRP.

El ACI 348 a la curva constitutiva del FRP curado, reduce su capacidad por un factor ambiental **CE** que depende del sitio donde se encuentra el elemento estructural a reforzar. Si se encuentra en la parte exterior la disminución de la capacidad es mayor con respecto a los elementos que se encuentran en la parte interior; de igual manera si se encuentra en un ambiente salino (como Manta) la reducción es mayor, se recomienda utilizar esos factores.



Figura 21 Columna que se ha venido describiendo de uno de los ingresos.

3.3 MALA ESTRUCTURACIÓN

El Pórtico D, tiene losa a un lado de un piso y losa al otro lado, con lo que se crea el problema de *columna corta* que se observa en la fotografía de la parte superior de la figura 22. En la parte central (Fig. 22) se observa una grada en la parte central, por lo que las vigas trabajan en voladizo en ese sitio.



Figura 22 Falla de *columna corta* en Pórtico D, de parqueadero de ULEAM; en la fotografía inferior se ve la mampostería.

En la fotografía inferior se observa que la mampostería era de 10 cm, de espesor con un vacío en la mitad, al tener tan poco espesor se tuvo un daño considerable, que se ve en las fotografías superiores de la figura 22

Para evitar el problema de *columna corta* en el Pórtico D, se derrocó toda la mampostería y se construyó un muro de hormigón con dos capas de armadura en sentido horizontal y transversal, ver figura 23. Cada una de las barras verticales está compuesta por dos varillas, la una se insertó 15 cm, en la viga superior y la otra igual cantidad en la viga inferior, quedando un traslape de 50 cm, entre las dos varillas. Algo similar se hizo con las varillas horizontales que están ancladas a las columnas, se utilizó anclaje químico. En la fotografía de la figura 23 se observa que a más de las mallas se colocó armadura diagonal.



Figura 23 Derrocamiento de mampostería y construcción de muro de hormigón armado. Fuente: Aguiar y Del Castillo (2019)

Los muros que se construyeron son de 25 cm, de ancho y se ubicaron en la mitad de la viga los que se hallan a los lados de la escalera; los restantes quedaron al ras de una de las caras de las vigas. En la fotografía izquierda de la figura 24 se observa que el muro, por ahora no se construyó de columna a columna, sino que terminó 1 m, antes debido a que la columna del extremo quedó muy dañada y se decidió reparar y reforzar la columna y luego se rellenó el metro que no se ha fundido. En la fotografía derecha se ve que el encofrado no está completamente recto, se dejó un pequeño chaflán en la parte superior para por ahí colocar el hormigón; este chaflán se eliminó después de la fundición, ver fotografía inferior de la figura 24.



Figura 24 Colocación del hormigón en uno de los muros, se aprecia que se fundió hasta un metro antes de la columna y en la fotografía inferior se ve el chaflán que luego se eliminó. Fuente: Aguiar y Del Castillo (2019).

3.4 REFORZAMIENTO DE COLUMNAS DEL EJE D

Las columnas del Pórtico D., fueron las más afectadas, por el problema de *columna corta*. La fotografía superior de la figura 25 puede ser considerada como representativa del daño. Nuevamente, aparentemente no existe mucho daño, pero al quitar el recubrimiento realmente se observó que las fisuras ingresan al núcleo de la columna. En la fotografía inferior se ve el muro de la figura 24, todavía tiene el chaflán y se ve que no se ha fundido a los dos lados de las columnas que ya han sido intervenidas para empezar con el reforzamiento.



Figura 25 Daño en columna corta del Eje D, en la parte superior y en la inferior se observa el muro que se ha reforzado hasta 1 m, antes de cada columna.
Fuente: Aguiar y Del Castillo (2019).

En las columnas que tuvieron daño, se quitó el recubrimiento como se ve en la fotografía superior de la figura 26, donde con un marcador se señaló las fisuras que ingresan al núcleo de la columna; se reparó primero las columnas y después se reforzaron con placas de acero.



Figura 26 Reforzamiento de las columnas del eje D. Primero se le reparo (foto superior) y después se reforzó con encamisado de acero. Fuente: Aguiar y Del Castillo (2019).

En la fotografía inferior izquierda se observa el reforzamiento de la columna en la cual termina el muro (fueron las columnas extremas del muro las más afectadas) y en la fotografía inferior derecha el reforzamiento de una columna central, nótese que la placa de acero se extendió a los dos lados de la columna y los pernos de anclaje atravesaron el muro de hormigón.

En resumen, en el pórtico D, se derrocó la mampostería y se construyó muros de hormigón como se aprecia en la figura 27, de esta manera se eliminó el problema de *columna corta*. Al encontrarse el muro en la mitad de la estructura no se tiene problemas de torsión.

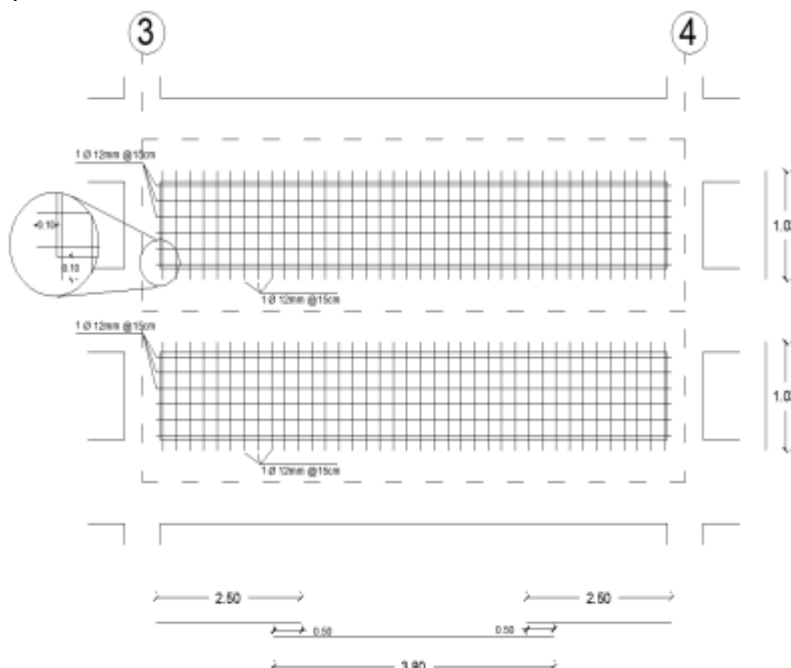


Figura 27 Derrocamiento de mampostería y construcción de muro de hormigón armado, en eje D.

3.5 CONTROL PERMANENTE DE PROYECTO

Una vez que se terminó con el reforzamiento estructural, los constructores se retiraron del Proyecto (Ing. Douglas Álvarez) y tomaron la posta los nuevos constructores encargados de instalaciones, paredes y acabados del proyecto.

Es importante que los responsables del reforzamiento estructural continúen hasta la finalización de la rehabilitación integral, para que no se den cosas como las mostradas en la figura 28, en que hicieron dos aberturas en el muro para pasar las instalaciones eléctricas, no se sabe si cortaron las varillas que se ven en la fotografía. La empresa SERMET S.A, fueron los que terminaron la construcción.

Esto no se puede hacer, el muro es estructural y no se puede crear zonas débiles y peor aún en la parte inferior donde se esperan grandes esfuerzos.



Figura 28 Aberturas en muros del Pórtico D, realizadas en etapa de terminados.

4. REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

Se encamisaron con acero algunas columnas de hormigón armado; en el eje D, se creó el muro de hormigón con el cual se eliminó el problema de *columna corta*, que ya se ha descrito en los apartados anteriores. Ahora se debe indicar dos trabajos adicionales a saber: i) Colocación de diagonales de acero en forma de “V” en el primer piso; y, ii) Colocación de disipadores de energía TADAS sobre contravientos de acero en forma de “V” invertida.

4.1 COLOCACIÓN DE DIAGONALES DE ACERO

En los vanos exteriores de cada una de las fachadas del primer piso (planta baja) se reforzó con diagonales concéntricas de acero, para el efecto lo primero que se hizo fue reforzar la cimentación con la construcción de plintos formados por mallas cuyos hierros se anclaron a la columna, vigas y losa de piso; este reforzamiento se lo ve en la fotografía izquierda superior.

Posteriormente se colocó un “collarín” en la parte inferior de la columna (placas de acero con filete de suelda) las mismas que van ancladas a las columnas (anclaje químico); en la fotografía superior derecha se observa que se está soldando una de las placas Gusset, la otra se encuentra al lado derecho de la fotografía también se observa que se han colocado las placas horizontales sobre la losa.

En la fotografía central se ve que se ha realizado un destaje en la diagonal tubular cuadrada y se ha introducido en la placa Gusset (conexión soldada)



Figura 29 Reforzamiento con diagonales concéntricas en Primer Piso de ex Parquadero de ULEAM.

Es conveniente que los pernos con los cuales se unen las placas verticales del collarín se coloquen a diferente altura, con relación a los pernos (varillas roscadas) de la otra cara para evitar que se puedan topar cuando se introducen en la columna.

Se debe verificar que las placas de acero del collarín estén completamente unidas a la columna, en caso de no estarlo se rellena con grout. Otra cosa a controlar es que cada perno tenga un torque de 220 lb/ft. **Después de un terremoto se suele desajustar los pernos por lo que se debe ajustar de nuevo hasta que tengan el torque indicado.** De igual manera se debe verificar el estado de la soldadura.

En la fotografía inferior de la figura 29, se encuentran ya las diagonales concéntricas colocadas y se observa que se está pintando a la placa vertical que se ha colocado en la cara de la columna; se colocaron dos placas verticales (a cada lado de la viga) y una placa horizontal que va soldada a las placas verticales, de tal manera que en la viga se refuerza con una placa de acero en forma de “C”, la placa horizontal de la “C” sirve para ahí soldar la placa Gusset superior, pero es importante reforzar de esta manera ya que así en el centro de luz se le incrementa la capacidad a flexión y corte de la viga, lo que es muy beneficioso para contrarrestar el desequilibrio de las fuerza “Pun” que se generan en las diagonales cuando estas ingresan al rango no lineal, que será tratado a continuación.

4.2 DESEQUILIBRIO EN DIAGONALES CONCÉNTRICAS

Cuando una estructura se refuerza con diagonales concéntricas en forma de “V” invertida se debe ver que la viga no vaya a fallar en caso de que una de las diagonales ingrese al rango no lineal, normalmente la que ingresa es la diagonal que trabaja a compresión; cuando esto sucede se produce un desequilibrio de las fuerzas en el punto de convergencia de las diagonales.

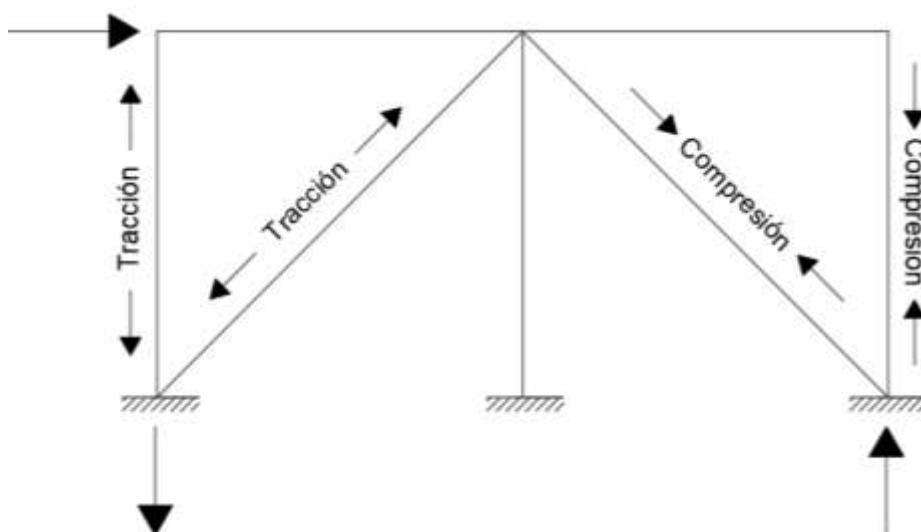


Figura 30 Comportamiento de un pórtico con diagonales concéntricas. Fuente: Cagua (2021).

En la figura 30 se presenta un pórtico sometido a una fuerza sísmica actuando de izquierda a derecha en el primer piso, por efecto de esta fuerza la columna izquierda trabaja a tracción y la columna derecha a compresión; de igual manera la diagonal izquierda trabaja a tracción y la diagonal derecha a compresión. Ahora, cuando el sismo actúa de derecha a izquierda se cambia la forma de trabajar de los elementos estructurales.

Cuando se tiene estructuras con diagonales se espera que las vigas y columnas trabajen en el rango elástico (no sufren daño) y que una de las diagonales ingrese al rango no lineal (la diagonal que trabaja a compresión); en este caso se da el desbalance de fuerzas y se genera la fuerza “Pun” que tiende a llevar al rango no lineal a la viga (daño en el punto de encuentro de las diagonales) y si la viga es débil puede llevar al colapso.

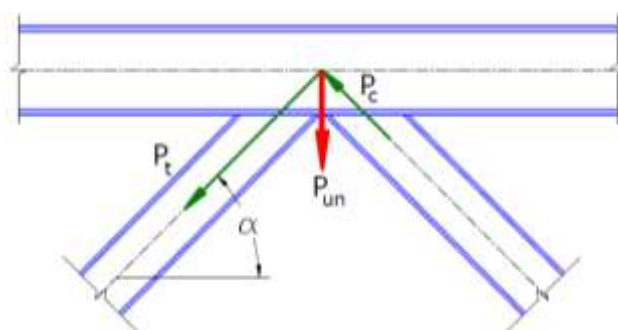


Figura 31 Desbalance de fuerzas en la unión de las 2 diagonales.

Para entender las fórmulas de cálculo con las cuales se calcula P_c y P_t indicadas en la figura 31 (fuerza a compresión y tracción, respectivamente) que son las que originan la fuerza P_{un} es importante ver la curva constitutiva de una diagonal de acero sometida a fuerzas cíclicas de compresión (tercer cuadrante) y tracción (primer cuadrante) que se muestran en la figura 32. Cuando trabaja a compresión hay una reducción significativa de su resistencia, en tracción no. Cómo se llega a este diagrama se indica a continuación.

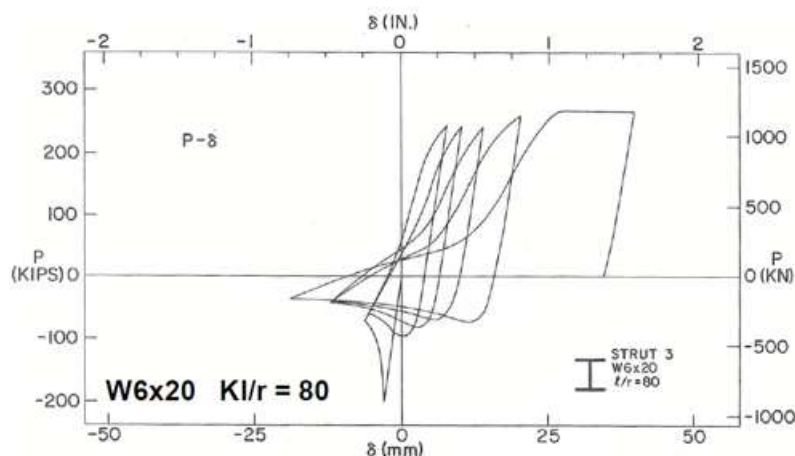


Figura 32 Curva constitutiva de una diagonal sometida a cargas cíclicas de compresión y tracción.

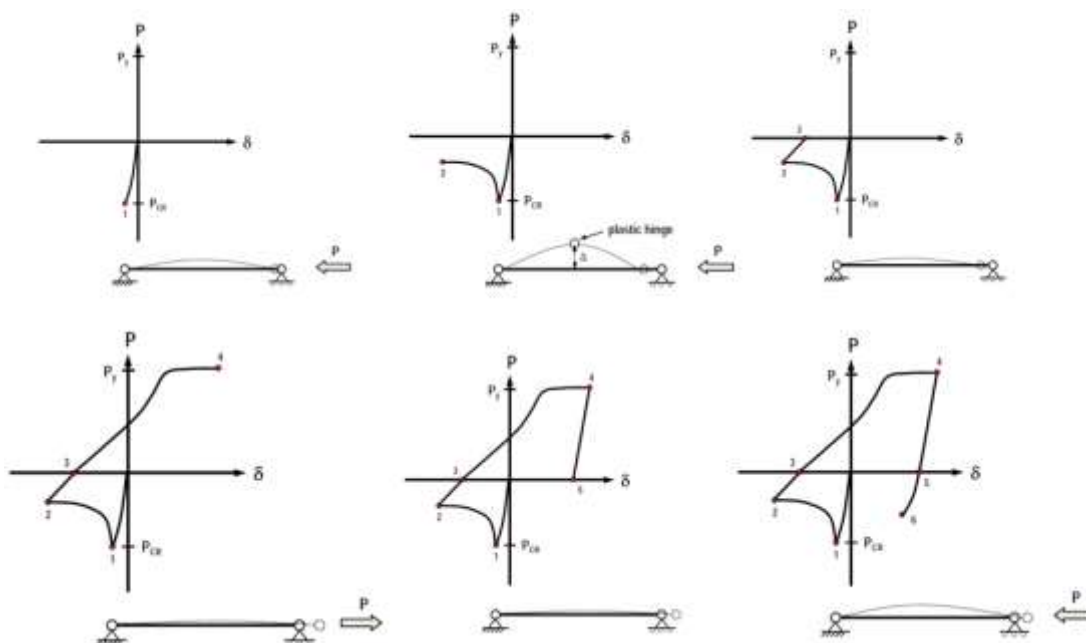


Figura 33 Descripción de las primeras fases del comportamiento de una diagonal sujeta a cargas cíclicas.

Si la fuerza axial a compresión es de tal magnitud que hace que la diagonal alcance su máxima capacidad a compresión P_{cr} (con la que se llega al pandeo), ahí se alcanza el punto 1, indicado en la gráfica superior izquierda de la figura 33, en la parte inferior se presenta la diagonal sometida a fuerza de compresión y se la ve pandeada.

Se continúa con la carga a compresión y la resistencia del elemento decae rápidamente hasta el punto 2, además se forma una articulación plástica en la mitad de la diagonal debido al momento $P - \Delta$ (gráfica central superior de la figura 33). Se inicia la descarga y en el punto 3, se tiene el caso en que $P = 0$. (gráfica superior derecha de la figura 33). Compárese las gráficas de las diagonales que están apoyada-apoyada para ver cómo se reduce la elástica de deformación cuando se inicia la descarga.

En la gráfica inferior izquierda a partir del punto 3 se inicia la carga a tracción en la diagonal y se llega al punto de fluencia P_y y se ingresa hasta el punto 4; en la gráfica central se tiene la descarga hasta llegar al punto 5 ($P=0$) y ahora se inicia la carga a compresión, pero no se llega al P_{cr} ya que hay degradación de resistencia y solo se alcanza el punto 6 (gráfica inferior derecha de figura 33) Con esta explicación conviene volver a mirar la figura 32 donde se aprecia la degradación de resistencia a compresión (carga residual que se considera aproximadamente 0.3 de P_{cr}). A continuación, se indican las ecuaciones de cálculo.

$$P_t = R_y \cdot F_y \cdot A_g \quad (1)$$

$$F_c = \min \left\{ \begin{array}{l} R_y \cdot F_y \cdot A_g \\ \frac{1}{0.877} \cdot F_{cr} \cdot A_g \end{array} \right. \quad (2)$$

$$P_c = 0.3 \cdot F_c \quad (3)$$

Donde R_y es el factor del esfuerzo de fluencia probable; F_y es el esfuerzo de fluencia del material; A_g ; es el área de la sección transversal del perfil de la diagonal. Para calcular el esfuerzo crítico F_{cr} se debe tener en cuenta el esfuerzo crítico de Euler $F_{crEULER}$

$$F_{crEULER} = \frac{\pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{K \cdot L}{r} \right)^2} \quad (4)$$

$$F_{crEULER} < 0.44 \cdot F_y \rightarrow F_{cr} = 0.877 \cdot F_{crEULER} \quad (5)$$

$$F_{crEULER} \geq 0.44 \cdot F_y \rightarrow F_{cr} = 0.658 \sqrt{\frac{F_y}{F_{crEULER}}} \cdot F_y \quad (6)$$

Para calcular F_{cr} se debe utilizar $R_y \cdot F_y$ en lugar de F_y en la ecuación (5) o (6). El significado del resto de variables es: K es el factor de longitud efectiva; L es la longitud del elemento; r es el radio de giro; E_s es el módulo de elasticidad del acero.

Una vez que se han definido las ecuaciones de cálculo de P_c , P_t indicadas en la figura 31, se descomponen estas fuerzas en sus componentes horizontal y vertical y se hace equilibrio de fuerzas verticales en el nudo con lo que se halla la fuerza P_{un} .

La viga que debe soportar la fuerza P_{un} es de 40/80 cm, además de eso está encamisada en el centro de luz con una placa de acero en forma de "C", de tal manera que no tiene dificultad en resistir la fuerza P_{un} .

4.3 DISIPADORES TADAS SOBRE DIAGONALES

El parqueadero tiene 4 pisos, en el primer piso solo se colocó diagonales de acero en forma de "V" con lo cual se rigidizó mucho ese piso y en los tres pisos superiores se colocaron disipadores de energía TADAS sobre contravientos de acero, de esta manera se rigidiza un poco la estructura y se le confiere amortiguamiento.

La disipación de energía se va a dar en los disipadores; se colocaron 16 disipadores en el piso 2; 8 en el piso 3 y 8 en el piso 4. Cada uno de los disipadores es de 6 placas; en la parte superior de la figura 34 se muestra el TADAS; en la parte central se ve a la izquierda la placa de flexión y a la derecha la placa de corte; finalmente abajo se presenta la curva constitutiva obtenida en el laboratorio de Estructuras de la Universidad Católica de Santiago de Chile.

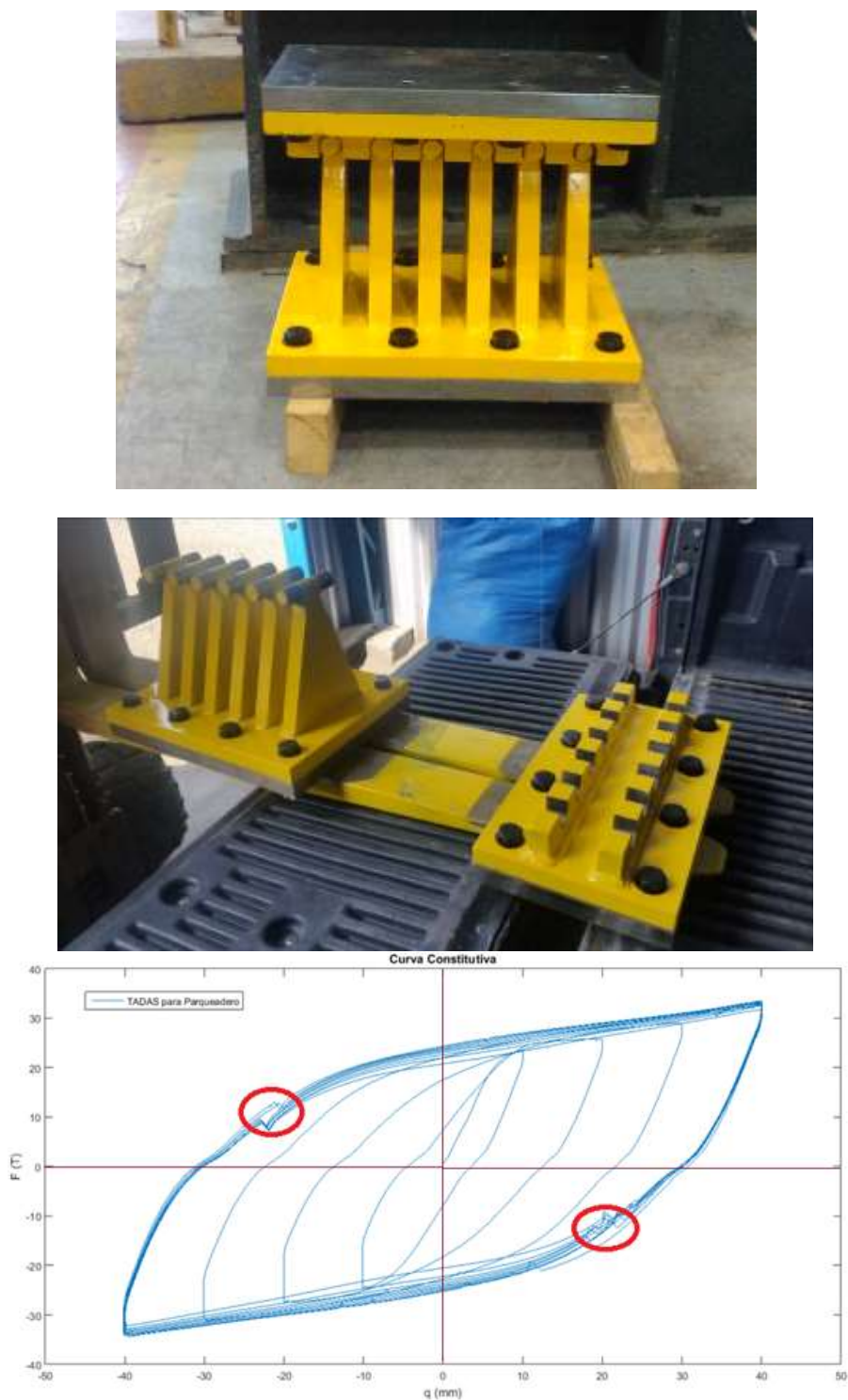


Figura 34 La fotografía superior muestra a un dissipador TADAS; la central a la placa de flexión y de corte; y en la inferior se muestra la curva constitutiva.

En la fotografía superior se aprecia que las placas exteriores están pintadas de plomo y el dissipador de color amarillo. Las placas de color plomo están unidas al dissipador por los 8 pernos, de tal manera que se puede separar las placas de color plomo y éstas son las que van soldadas a la placa horizontal de la “C” con que se reforzó la viga y la otra va soldada a la placa horizontal que está sobre la placa Gusset superior.

En la figura 35 se observa el TADAS colocado en el vano exterior de un pórtico; y en el pórtico perpendicular también se colocó el TADAS sobre diagonales de acero circulares. El reforzamiento se realizó en las cuatro esquinas del parqueadero, la fotografía de la figura 35 corresponde a una de las esquinas.



Figura 35 Disipadores TADAS sobre diagonales concéntricas en el tercer piso de parqueadero de ULEAM.

En la fotografía de la figura 35 se aprecia: i) la columna en la parte inferior tiene un collarín de acero; ii) se aprecian las placas Gusset inferior y superior; iii) la unión de las diagonales con las placas Gusset es soldada para lo cual se realizó un destaje en la columna y se insertó el tubo en la placa para luego proceder a soldar; iv) se aprecian las placas de acero en forma de “C” en la parte inferior de la viga.

4.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON DISIPADORES TADAS

La figura 36, es referencial, no tiene nada que ver con el reforzamiento del ex parqueadero de la ULEAM; y el objetivo es ilustrar que existen dos formas para realizar el análisis sísmico de una estructura con disipadores de energía TADAS colocado sobre diagonales de acero concéntricas.

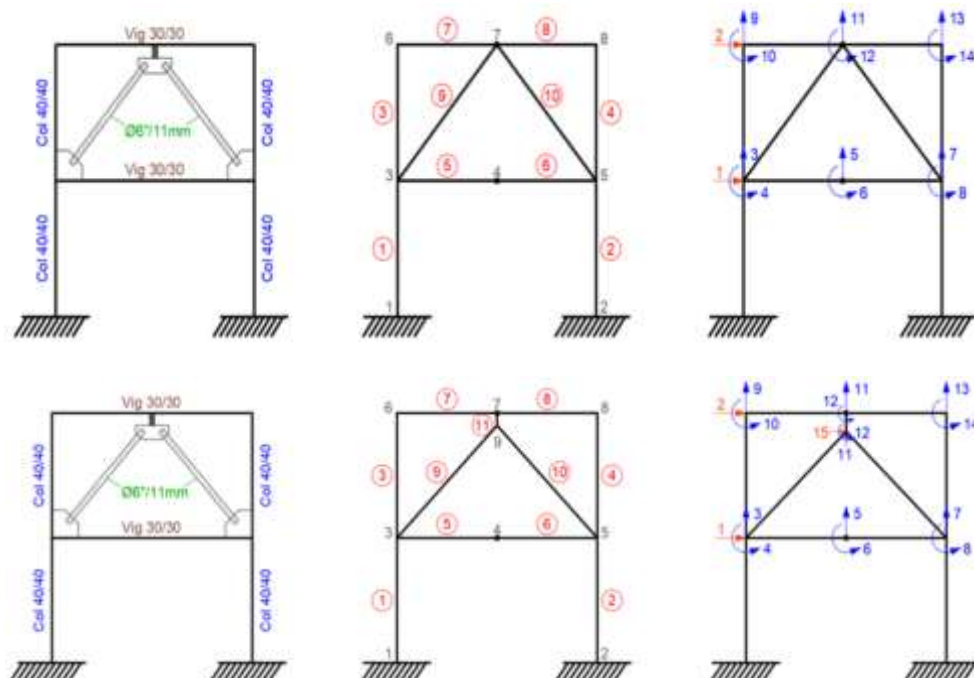


Figura 36 Dos formas de análisis de una estructura con disipador TADAS sobre diagonales concéntricas; i) Modelo de la Diagonal equivalente, en la parte superior; y, ii) Modelo de Elemento Disipador, en la parte inferior.

La primera de ellas se presenta en la parte superior de la figura 36, en la que el sistema: disipador-diagonal, se sustituye por una diagonal equivalente que en la parte central se han numerado como elementos 9 y 10; a la derecha se tienen los 14 grados de libertad y con rojo se ha numerado las coordenadas principales.

En la parte inferior de la figura 36, al elemento disipador se lo considera como un elemento más de la estructura; en este caso se tiene 11 elementos, siendo el disipador el elemento 11; los grados de libertad se indican en la figura inferior derecha, se tiene 15 grados de libertad.

En este artículo se presenta a continuación el modelo de la diagonal equivalente; para el efecto en la gráfica superior izquierda de la figura 37 se indica una de las diagonales y un disipador Shear Link. Se cambió de disipador para explicar que lo que se está tratando sirve para disipadores: ADAS, TADAS, Shear Link, que son disipadores por fluencia del material. Se ha definido k_{diag} a la rigidez axial de la diagonal; k_{ef} a la rigidez efectiva que se obtiene en base a la curva constitutiva del disipador que se muestra en la parte superior derecha; k_{dis} es la rigidez del disipador en la misma dirección de la diagonal.

$$k_{diag} = \frac{E_s A}{L} \quad (7)$$

$$k_{dis} = T^t k_{ef} T \quad (8)$$

Donde E_s es el módulo de elasticidad del material; A es el área de la sección transversal de la diagonal; L es la longitud de la diagonal; T es la matriz de paso de la componente horizontal a la componente en la dirección de la diagonal; k_{ef} es la rigidez efectiva.

$$T = \frac{1}{\cos \theta} \quad (9)$$

Siendo θ el ángulo que forma la diagonal de acero con el eje de las X; en la figura superior izquierda se presenta el valor de θ . Por cierto, la matriz de paso y la deducción de la ecuación (8) está explicado en Aguiar (2020) en forma general.

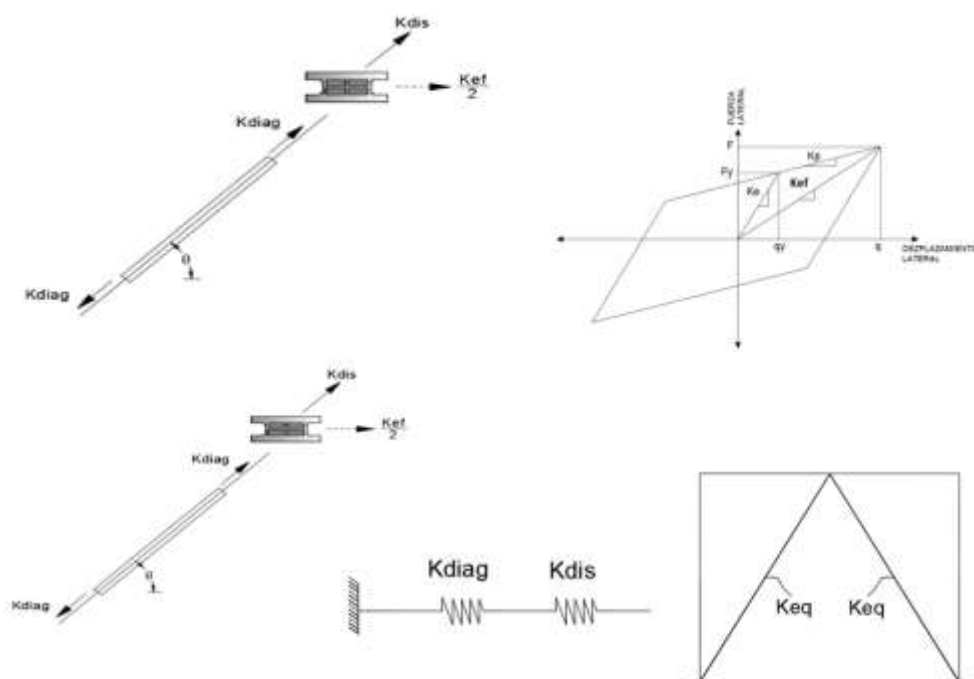


Figura 37 En la parte superior izquierda se presenta una diagonal y un disipador Shear Link, a la derecha la curva constitutiva; en la parte central inferior el modelo de dos resortes en serie y a la derecha el modelo de diagonal equivalente.

En la figura 34 se presenta el modelo constitutivo del disipador de energía de 6 placas que se está utilizando. Ahora bien, un modelo de análisis es el bilineal que se indica en la figura superior derecha; donde se ha indicado la nomenclatura que definen estos puntos. En Aguiar *et al.* (2016) se deducen las ecuaciones de cálculo de los puntos notables para disipadores ADAS y TADAS, en base a la resistencia de materiales. A continuación, se indica el formulario para disipadores TADAS.

$$F_y = n \frac{f_y b t^2}{6 h} \quad q_y = \frac{f_y h^2}{E_s t} \quad (10)$$

$$k_e = n \frac{E_s b t^3}{6 h^3} \quad k_p = \alpha k_e \quad (11)$$

$$F = F_y + k_p (q - q_y) \quad k_{ef} = \frac{F}{q} \quad (12)$$

Donde n es el número de placas; f_y es el límite de fluencia del material; b, h, t ; son la base, la altura y el espesor de una placa del TADAS; F_y, q_y ; son la fuerza y desplazamiento en el punto de fluencia; k_e, k_p ; son la rigidez elástica, rigidez plástica y α es la relación entre la rigidez post fluencia con respecto a la rigidez elástica (normalmente se considera $\alpha = 0.02$); F , es la fuerza en el disipador asociada al desplazamiento relativo q .

La rigidez efectiva se obtiene dividiendo la fuerza F que actúa en el disipador asociada al desplazamiento relativo lateral q . En este punto es necesario aclarar que la rigidez efectiva no es un valor fijo, depende del desplazamiento relativo q . Por esta razón el análisis estructural se realiza en forma interactiva, para el efecto se impone unos desplazamientos relativos q con los cuales se halla k_{ef} y se realiza el análisis sísmico con el Método Espectral; luego se encuentran los nuevos desplazamientos relativos y así se continúa por algunos ciclos hasta lograr que los desplazamientos relativos impuestos sean aproximadamente iguales a los desplazamientos relativos calculados.

Por otra parte, es importante tener presente los valores de la curva constitutiva indicados en la figura 34; ahí se aprecia que el desplazamiento relativo máximo es de 40 mm; un valor superior a este valor provoca daño en el disipador. En el disipador de 6 placas analizado hasta 45 mm, de desplazamiento lateral no presentó daño por lo que puede ser considerado como valor límite. Entonces es importante chequear los desplazamientos relativos que se van obteniendo en el análisis si son muy altos habrá que pensar en utilizar disipadores de mayor tamaño o trabajar con 2 disipadores. El caso contrario se tiene cuando los desplazamientos relativos son muy bajos, en ese caso se debe pensar en utilizar disipadores de menores dimensiones o menor número de placas.

Retomando en la parte central inferior de la figura 37 se tienen dos resortes en serie; el uno es la diagonal con rigidez k_{diag} y el otro es el disipador (en la misma dirección de la diagonal) con rigidez k_{dis} . Trabajan en serie ya que los desplazamientos son diferentes. Para resortes en serie se tiene que la rigidez equivalente k_{eq} se calcula con la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_{diag}} + \frac{1}{k_{dis}} \quad (13)$$

$$k_{eq} = \frac{k_{diag} k_{ef}}{k_{ef} + 2 \cos^2 \theta k_{diag}} \quad (14)$$

5. USO DE CEINCI-LAB PARA PÓRTICOS CON DIAGONALES

Se va a trabajar con la diagonal equivalente, para modelar la diagonal con el disipador. Por lo tanto, en este apartado se presenta la generación de diagonales en los Pórticos A y 1, que son los perimetrales. Se destaca que el Pórtico A, es similar al Pórtico G y el Pórtico 1, es similar al Pórtico 6, donde también se reforzó con diagonales a secas en el primer piso y con disipadores TADAS sobre diagonales en los pisos superiores.

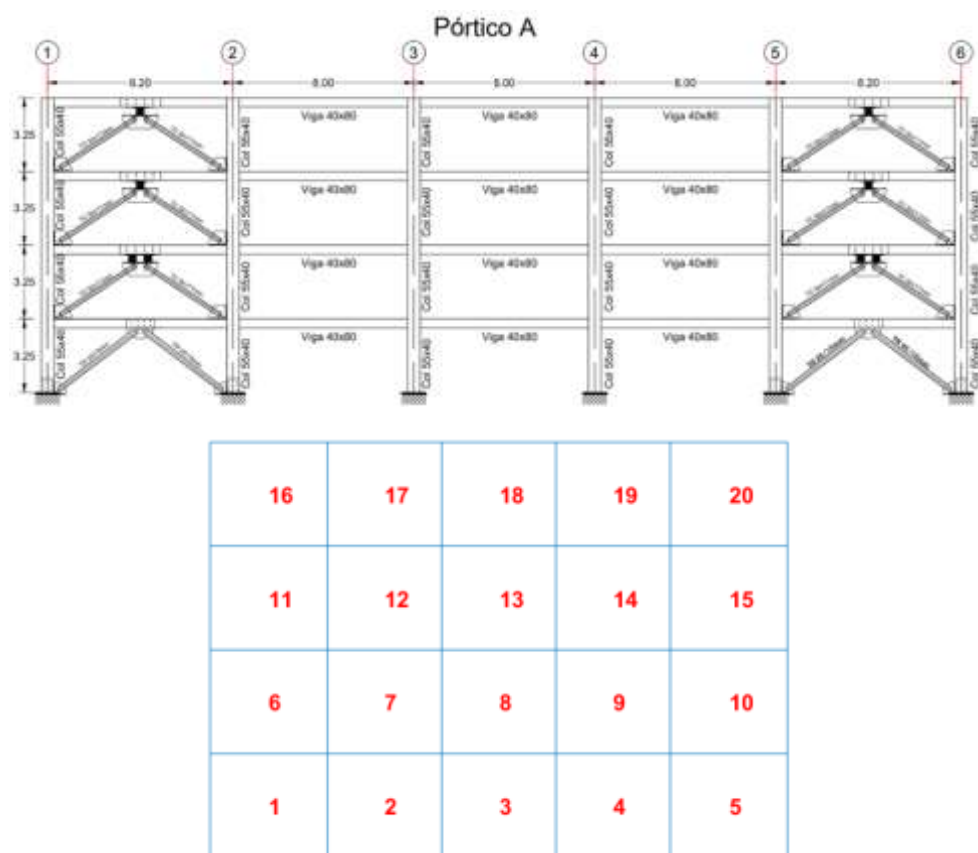


Figura 38 En la parte superior la geometría del Pórtico A, reforzado con diagonales en el primer piso, 2 TADAS sobre diagonales en el segundo piso y un TADAS sobre diagonales en tercer y cuarto piso; en la parte inferior se indica la numeración de los vanos.

En la parte superior de la figura 38 se muestra la geometría del pórtico reforzado y en la parte inferior, se tiene la numeración de los vanos, que se obtuvo con el programa *dibujovanos*. Es necesario tener presente los números con que se definen los vanos ya que se debe indicar los números de los vanos que tienen diagonales.

Se va a trabajar con el programa *Ej_art_porticoA_2* que dibuja el pórtico sin diagonales, en ese programa se indica en primer lugar los vanos que tienen

diagonales concéntricas en el vector **mar** y luego se indican las funciones que generan las diagonales.

El programa que genera el número de elemento y la identificación del nudo inicial y final de las diagonales se llama **geometría_nudo_diagonales**, por eso el archivo de salida se denomina **GEN**. Ahora para encontrar los vectores NI, NJ que contiene los vectores con los nudos inicial y final pero solo de las diagonales, se utiliza el programa **gn_portico** ya detallado anteriormente. Pero al nombre de los vectores se recomienda llamarlos NI2, NJ2, para diferenciarlo de los vectores NI, NJ, que contiene la información del pórtico sin las diagonales.

Finalmente es necesario unir los vectores NI, NJ, NI2, NJ2 para tener la estructura con diagonales, esto se lo hace con el programa **gn_portico3**.

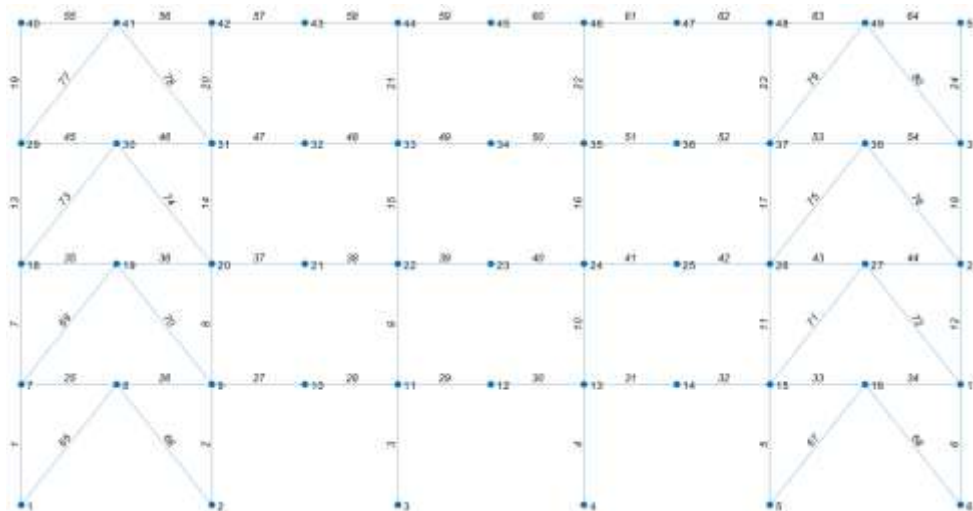


Figura 39 Numeración de nudos, elementos de columnas, vigas y diagonales.

El programa que genera la geometría del Pórtico A, con la inclusión de las diagonales se ha denominado **Ej_art_porticoA_2R** que se lista a continuación, pero antes se indica que en la figura 39, se presenta el Pórtico A. Nótese que al final se han numerado las diagonales.

```
sv=[8.2;8.0;8.0;8.0;8.2]; % Luces de vanos
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; % Alturas de pisos
mar=[1;5;6;10;11;15;16;20]; % Vanos que tienen diagonales
% Funciones que genera el pórtico sin diagonales
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
% Funciones que generan las diagonales y pórtico con diag.
[GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI,NJ]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
```

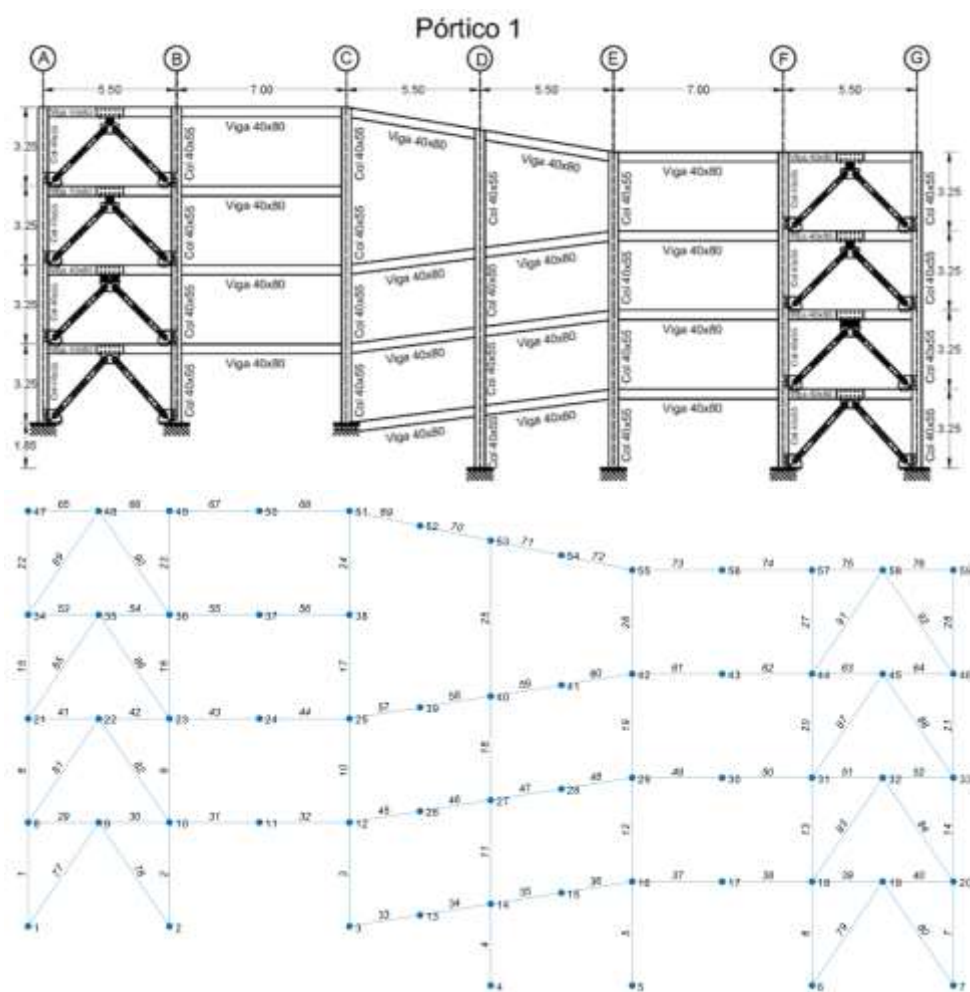


Figura 40 En la parte superior se presenta la geometría de Pórtico 1, reforzado; en la parte inferior se indica el modelo numérico de cálculo hallado con las funciones de **CEINCI-LAB**

Ahora a partir del programa **Ej_art_portico1_1** ya presentado que genera el Pórtico 1, sin diagonales, se generó el programa **Ej_art_portico1_1R** que incorpora las diagonales y se obtiene el modelo de cálculo de la figura 40. A continuación se lista el programa.

```
sv=[5.5;7;5.5;5.5;7;5.5]; %Distancia de los vanos [m]
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Altura de piso [m]
mar=[1;6;7;12;13;18;19;24];
z=1.85; %cota de desnivel [m]
mar_desn=[3]; %Vano donde empieza el desnivel
nvramp=2; %Número de vanos con viga inclinada
[nv,np,nudcol,nudvlg,nudt,nod,nr,ngl]=geometria_desn_2b(sv,sp);
[Nl,Nj]=gn_portico_desn_2b(nr,nv,np,nudt,nudcol,nudvlg,mar_desn);
[X,Y]=glinea_desn_2b(nv,np,sv,sp,nod,nr,mar_desn,z,nvramp);
% Funciones que generan las diagonales y pórtico con diag.
```

```
[GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI,NJ]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
```

6. MATRIZ DE RIGIDEZ LATERAL

La matriz de rigidez lateral es aquella matriz asociada a las coordenadas laterales (un desplazamiento lateral por piso) y dependiendo de cómo se numeren los grados de libertad, tenemos las formas de cálculo. En efecto, si se numeran las coordenadas laterales (coordenadas principales) primero como en el pórtico indicado en la figura 15 y 16, se tienen dos formas de cálculo para la condensación estática de la matriz de rigidez: i) Mediante el cálculo de la inversa de una matriz; y, ii) Mediante la solución de ecuaciones lineales.

Ahora si las coordenadas laterales se numeran al final se tiene tres formas de cálculo, las dos enunciadas en el párrafo anterior y la tercera es mediante la reducción de Gauss de la matriz de rigidez. Aguiar (2020).

Para los dos casos de numeración de las coordenadas laterales: al principio o al fin, se debe hallar la matriz de rigidez de la estructura por ensamblaje directo. A continuación, se indican las funciones que llevan a ese objetivo.

6.1 DATOS PARA ENCONTRAR LA MATRIZ DE RIGIDEZ

Una vez que se tiene definido la geometría del pórtico (vectores X, Y, NI, NJ) se determinan los grados de libertad para el análisis dinámico, para ello dependiendo de la forma del pórtico se tienen varias funciones. A continuación, se indican algunas de ellas.

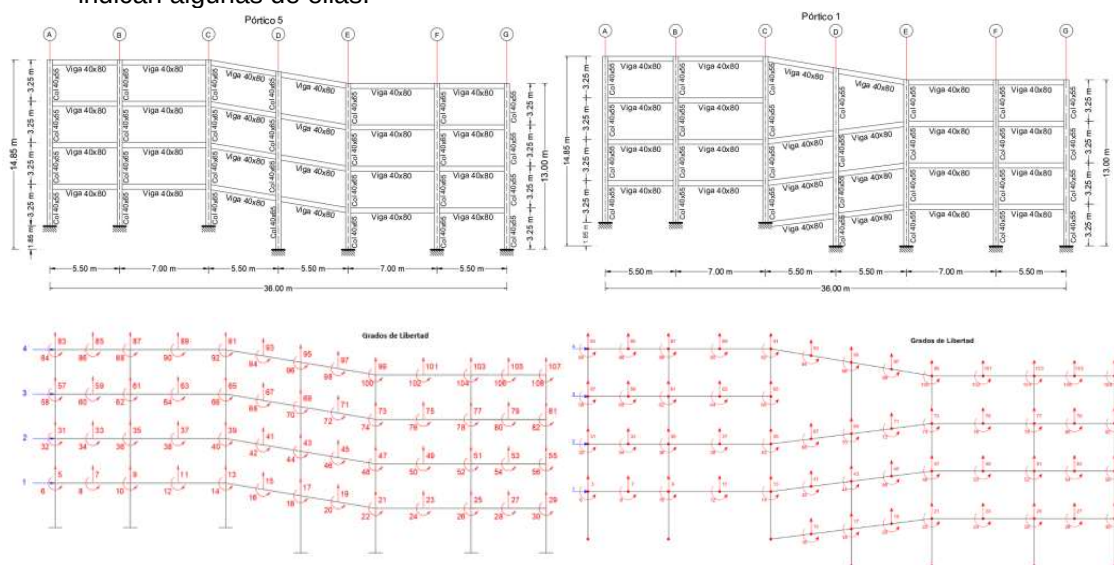


Figura 41 Estructuras irregulares y grados de libertad para hallar la matriz de rigidez lateral

- **[CG]=cg_desn_2(nr,np,nv,nod)**

Para las estructuras indicadas en la parte superior de la figura 41, la función con la cual se hallan los grados de libertad indicados en la parte inferior de la figura 41, es **cg_desn_2**, los datos de entrada son: **nr**, número de nudos restringidos; **np**, es el número de pisos; **nv**, es el número de vanos y **nod** es el número de nudos. En la matriz que reporta el programa **CG** se tienen los grados de libertad de cada uno de los nudos.

- **[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y)**

La función **cg_sismo2** determina los grados de libertad para estructuras regulares en elevación en que se considera un nudo en la mitad de la viga. Los datos de entrada son: **nod**, el número de nudos; **nr**, número de nudos restringidos; **Y** vector con las coordenadas en Y, de los nudos. El programa reporta la matriz **CG** ya descrita y el número de grados de libertad **ngl**

- **[VC] = vc (NI,NJ,CG)**

El programa **vc** determina los vectores de colocación de estructuras que tienen tres grados de libertad por nudo. La forma de uso es: **[VC] = vc (NI,NJ,CG)**. Donde **NI** es el vector que contiene a los nudos iniciales; **NJ** el vector con los nudos finales; **CG** es una matriz con las coordenadas generalizadas. El programa reporta la matriz que contiene a los vectores de colocación de cada uno de los elementos. El vector de colocación está compuesto por los grados de libertad del nudo inicial y del nudo final, son 6 elementos por cada uno de los elementos.

- **[L,seno,coseno]=longitud (X,Y,NI,NJ)**

El programa **longitud** determina la longitud; $\sin \alpha$ y $\cos \alpha$ de cada uno de los elementos de una estructura plana. Donde α es el ángulo que forma el eje del elemento con el eje de las X. El programa reporta tres vectores, denominados **L**, que contiene la longitud de cada uno de los elementos; **seno** con el valor de la función seno de cada elemento y **coseno** con el valor del coseno de cada elemento. Los datos de entrada son los vectores con las coordenadas de los nudos **X**, **Y**, los vectores que contienen a los nudos inicial y final de cada elemento **NI**, **NJ**

6.2 FUNCIONES PARA HALLAR LA MATRIZ DE RIGIDEZ

Se van a indicar las funciones para encontrar la matriz de rigidez del Pórtico A, reforzado con diagonales a secas, en el primer piso; con disipadores TADAS sobre diagonales en los pisos superiores. En la parte superior de la figura 38, se indica la estructura.

Se aplica el principio de superposición para encontrar la matriz de rigidez de la estructura. Por lo tanto, primero se encuentra la contribución de los elementos de hormigón a la matriz de rigidez; luego de las diagonales de acero y finalmente del conjunto diagonal-disipador mediante el modelo de la diagonal equivalente.

- **[K] = krigidez (ngl, ELEM, L, seno, coseno, VC, E)**

Programa que determina la matriz de rigidez de Pórticos Planos o de Armaduras Planas. Las variables que han sido ya definidas son: **ngl** es el número de grados de libertad de la estructura; **L**, es un vector con la longitud de cada uno de los elementos; **seno**, **coseno**, vectores con los senos y cosenos de cada elemento; **VC** es la matriz con los vectores de colocación de cada elemento. Las variables no definidas todavía, son: **E** es el módulo de elasticidad del material; **ELEM** contiene la base y la altura de cada una de las secciones. Para **armaduras planas**, **ELEM**, está compuesto por el área de la sección transversal de cada uno de los elementos.

- **[K] = krigidez_acero (ngl, ELEM, L, seno, coseno, VC, E)**

Este programa es similar a **krigidez** encuentra la matriz de rigidez de un pórtico plano por ensamblaje directo, lo que cambia es el contenido de la matriz **ELEM** en este caso se da como dato el área y la inercia de cada elemento. Su nombre hace referencia al acero ya que en estos elementos se trabaja con el área y la inercia, pero también se aplica a hormigón armado cuando se trabaja con columnas circulares.

- **[F,Kef,Zeda]=rigidez_efectiva_TADAS(n,b,t,h,fy,qr,alfa,Est)**

El programa **rigidez_efectiva_TADAS** determina la rigidez efectiva **kef**, el factor de amortiguamiento **Zeda** y la fuerza que se genera en el dissipador TADAS asociada al desplazamiento **qr** que ingresa como dato; los otros datos son **n** es el número de placas del dissipador; **b**, **h**, **t**, son la base, altura y espesor de una placa del TADAS; **fy** es la fluencia del material del TADAS; **alfa** es la relación entre la rigidez post fluencia **kp** con relación a la rigidez elástica **ke**; finalmente **Est** es el módulo de elasticidad del material del TADAS

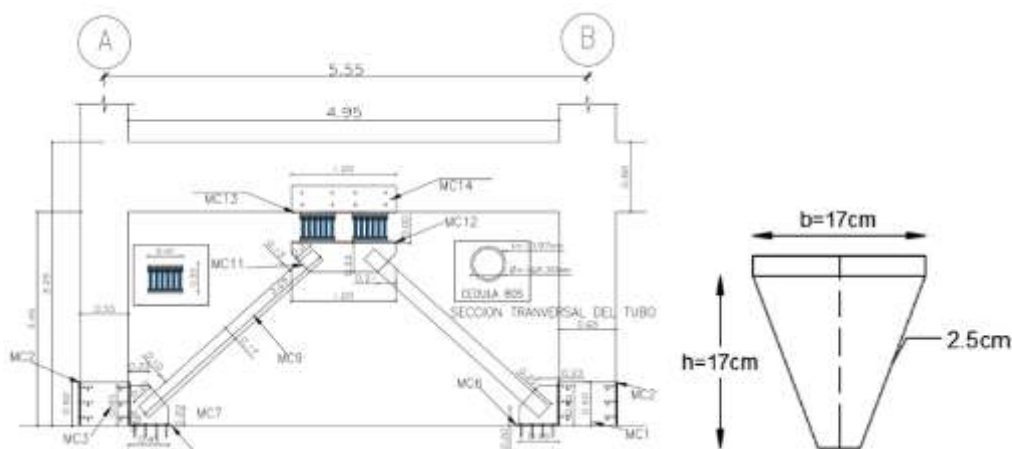


Figura 42 Geometría del Pórtico 1, en el segundo piso en que se tienen 2 TADAS de 6 placas y dimensiones de cada placa. Fuente: Álvarez (2021)

Como se había indicado en el segundo piso se colocaron 2 dissipadores TADAS de 6 placas, como se observa en la figura 42. Luego los datos de entradas

son: $n = 12; b = 17 \text{ cm}; h = 17 \text{ cm}; t = 2.5 \text{ cm}, f_y = 3200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}; \alpha = 0.02; E_{st} = 2100000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$. Falta indicar el corrimiento relativo q_r en el segundo piso. Se inicio con $q_r = 5.03 \text{ cm}$; es un valor alto si se observa la curva constitutiva de la figura 34, pero se debe tener en cuenta que se colocan 2 TADAS de 6 placas.

Si se trabaja con las unidades indicadas la rigidez efectiva que se obtiene está en $\frac{\text{kg}}{\text{cm}}$, por lo que este valor se multiplica por 10 para tener en $\frac{\text{T}}{\text{m}}$. Es importante destacar que el acero A36, en Chile tiene un límite de fluencia de $f_y = 3200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$. Por esta razón antes de empezar el cálculo estructural se debe saber en que lugar se va a comprar los disipadores y averiguar el valor de f_y . La rigidez efectiva se obtuvo con las ecuaciones 10 a 12.

Finalmente se debe indicar que el factor de amortiguamiento ξ que reporta el programa, está asociado al desplazamiento relativo dado y es un valor bastante alto, pero no se trabaja con ese valor debido a que no es el factor de amortiguamiento de toda la estructura.

- **[Kdiag,Keq]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H,Kef,adiag,Es)**

El programa **rigidez_equivalente_TADAS** determina la rigidez axial de la diagonal k_{diag} (ecuación 7) y la rigidez equivalente k_{eq} (ecuación 14). Los datos que se dan a este programa son: h_{ci}, h_{cd} altura de la sección transversal de la columna izquierda y de la columna derecha; h_{dis} es la altura del disipador; Lon es la longitud del vano; h_v es la altura de la viga; H es la altura de entrepiso (con toda esta información se determina la longitud de la diagonal); k_{ef} es la rigidez efectiva; a_{diag} es el área de la sección transversal de la diagonal; E_s es el módulo de elasticidad del material de las diagonales. Con relación al pórtico de la figura 42, los datos de entrada son:

$$h_{ci} = 0.55 \text{ m}; h_{cd} = 0.65 \text{ m}; h_{dis} = 0.30 \text{ m}; Lon = 5.55 \text{ m}; h_v = 0.80 \text{ m}; H = 3.25 \text{ m};$$

- **[KTA]=krigidez_tadas(mbr,ngl,ELEMT,senT,cosT,VCT)**

El programa **krigidez_tadas** encuentra la matriz de rigidez de la diagonal equivalente y luego realiza el ensamblaje directo a la matriz de rigidez de la estructura K que en la función se ha denominado KTA . Los datos de entrada son: **mbr** número de elementos de diagonales equivalentes; **ngl** número de grados de libertad de la estructura; **ELEMT**, vector que contiene la rigidez equivalente de cada una de las diagonales; **senT, cosT**, son vectores que contienen los valores de seno y coseno de las diagonales equivalentes; **VCT** matriz con los vectores de colocación de cada una de las diagonales; cada fila de **VCT** tiene 6 elementos que son los grados de libertad: desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y rotación del nudo inicial; lo propio para el nudo final.

La matriz de rigidez del elemento diagonal equivalente se indica a continuación, se han colocado ceros en la tercera y sexta fila y columna porque no existe el grado de libertad rotacional en la diagonal equivalente que trabaja apoyada-apoyada.

$$\mathbf{k}_3 = k_{eq} \begin{bmatrix} \cos \theta^2 & \text{sen} \theta \cos \theta & 0 & -\cos \theta^2 & -\text{sen} \theta \cos \theta & 0 \\ \text{sen} \theta \cos \theta & \text{sen} \theta^2 & 0 & -\text{sen} \theta \cos \theta & -\text{sen} \theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta^2 & -\text{sen} \theta \cos \theta & 0 & \cos \theta^2 & \text{sen} \theta \cos \theta & 0 \\ -\text{sen} \theta \cos \theta & -\text{sen} \theta^2 & 0 & \text{sen} \theta \cos \theta & \text{sen} \theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde θ es el ángulo que forma el eje de la diagonal-equivalente con el eje horizontal. El programa **kdiagonal_tadas** determina $\mathbf{k}_3$ y es llamado por el program **krigidez_tadas**.

6.3 CONDENSACIÓN ESTÁTICA

Para el caso en que se numeran primero las coordenadas laterales, la ecuación de equilibrio estático particionada es la siguiente.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Q}_a \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{k}_{ba} & \mathbf{k}_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q}_a \\ \mathbf{q}_b \end{pmatrix} \quad (16)$$

Donde $\mathbf{Q}_a$ es un vector con las fuerzas laterales; $\mathbf{q}_a$ es un vector con los desplazamientos laterales (coordenadas principales); $\mathbf{q}_b$ es el vector que contiene a los desplazamientos verticales y giros (coordenadas secundarias). Las sub matrices de la matriz de rigidez $\mathbf{K}$, son $\mathbf{K}_{aa}$ de orden (na, na) ; $\mathbf{K}_{ab}$ de orden (na, nb) ; $\mathbf{K}_{ba} = \mathbf{K}_{ab}^t$; $\mathbf{K}_{bb}$ de orden (nb, nb) . Siendo na el número de coordenadas principales y nb el número de coordenadas secundarias.

Al desarrollar la ecuación matricial (16) se llega a obtener la matriz de rigidez lateral $\mathbf{K}_L$ (matriz condensada a las coordenadas principales. Aguiar (2020)

$$\mathbf{K}_L = \mathbf{K}_{aa} - \mathbf{K}_{ab} \mathbf{K}_{bb}^{-1} \mathbf{K}_{ba} \quad (17)$$

Ahora si al producto matricial $\mathbf{K}_{bb}^{-1} \mathbf{K}_{ba}$ se le llama matriz $-\mathbf{T}$ al multiplicar la ecuación por $\mathbf{K}_{bb}$ se tiene:

$$\mathbf{K}_{bb} \mathbf{T} = -\mathbf{K}_{ba} \quad (18)$$

Al sustituir la matriz $\mathbf{T}$ en la ecuación (17) se tiene:

$$\mathbf{K}_L = \mathbf{K}_{aa} + \mathbf{K}_{ab} \mathbf{T} \quad (19)$$

Por lo tanto, la matriz de rigidez lateral se puede calcular con la ecuación (16) que implica encontrar la matriz inversa de $\mathbf{K}_{bb}$ y la otra forma de cálculo es mediante la ecuación (19) en este caso se debe resolver el sistema de ecuaciones lineales definido en (18) para hallar la matriz $\mathbf{T}$.

Uno de los objetivos del sistema de computación **CEINCI-LAB** es que el usuario sepa lo que está haciendo, por ese motivo una vez que obtiene la matriz de rigidez de la estructura **K** utilizando las funciones de **CEINCI-LAB** deberá definir las sentencias para hallar las sub matrices y luego programar la ecuación (17) si va a calcular mediante la obtención de una matriz inversa o programar la ecuación (19) si va a calcular mediante la solución de un sistema de ecuaciones.

6.4 PROGRAMA PARA CALCULAR KL DE PÓRTICO A REFORZADO

El programa que determina la matriz de rigidez lateral del Pórtico A, reforzado con diagonales en el primer piso y con TADAS sobre diagonales en los pisos 2 a 4, se denomina **Portico_A_reforzado**, su lectura ayudará a entender la teoría.

```
%Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sv=[8.20;8.00;8.00;8.00;8.20]; % Ingresar luces de los vanos
sp=[3.25;3.25;3.25;3.25]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
mar=[1;5;6;10;11;15;16;20]; % Número del vano donde van diagonales
%% Geometría del Pórtico con diagonales
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr); % Coordenadas de los nudos
[Ni,Nj]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg); % Nudos Ni y Nj sin diagonales
[GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar); % Se incorporan diag.
[Ni2,Nj2]=gn_portico(GEN); % Nudos inicial y final solo de diagonales
[Ni,Nj]=gn_portico3(Ni,Nj, Ni2,Nj2); % Acoplamiento de nudos inicial y final
% dibujoplano(X,Y,Ni,Nj);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); % Grados de libertad para análisis sísmico
[VC]=vc(Ni,Nj,CG); % Matriz con los vectores de colocación de elementos
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,Ni,Nj); % Vectores con longitud, seno y coseno
% dibujogdl(X,Y,Ni,Nj,CG);
%% Geometria de elementos
Eh=150000*sqrt(240); %Módulo de Elasticidad del hormigón T/m²
Es=21000000; %Módulo de elasticidad del acero, T/m
Fy=25310.505; % esfuerzo de fluencia del acero A36 en Ecuador
Fu=40778.036; % Esfuerzo último de acero A36 en Ecuador
bcl=0.55;hcl=0.40; % Dimensiones de las Columnas interiores del Pórtico A
bcE=0.55;hcE=0.40; %Dimensiones de las Columnas exteriores de Port. A
bv=0.40;hv=0.80; % Dimensiones de las Vigas
%SECCIONES
%Columnas y vigas de hormigon
[ELEMA]=[bcE hcE;repmat([bcl hcl],[4 1]);bcE hcE;
        bcE hcE;repmat([bcl hcl],[4 1]);bcE hcE;
        bcE hcE;repmat([bcl hcl],[4 1]);bcE hcE;
        bcE hcE;repmat([bcl hcl],[4 1]);bcE hcE; %columnas
        repmat([bv hv],[40 1]);% Vigas

% Diagonales cuadradas en el 1 Piso 250X250X15. Cálculo de área e inercia
Material=1;Type=3;%1=TIPO I; 2=TIPO H; 3=CUADRADA; 7=CIRCULAR;
d=0.250;tw=0.015;bs=0.25;bi=0.25;tfs=0.015;tfi=0.015;
cpc=1; %Conexión precalificada
Lon=4.0; %Longitud de la diagonal no influye para cálculo de área e inercia
```

```

SectionD250=[Material,Fy,Fu,Es,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi];
[~,~,~,~,~,adiag1,l,~,~,~,~,~,~]=Geom_acero(SectionD250,Lon,cpc);
% Diagonales circulares desde el 2 Piso al 4 Piso TC 6'/11 mm
Material=1;Type=7;d=0.1744;tw=0.011;
cpc=1; %Conexión precalificada
Lon=4.0; %Longitud de la diagonal no influye para cálculo de área e inercia
SectionD170=[Material,Fy,Fu,Es,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi];
[~,~,~,~,~,adiag2,l,~,~,~,~,~,~]=Geom_acero(SectionD170,Lon,cpc);

%% MATRIZ DE RIGIDEZ DE COLUMNAS Y VIGAS
LH=L(1:64);senH=seno(1:64);cosH=coseno(1:64);
VCH=VC(1:64,:);
[KT]=kgridez(ngl,ELEMA,LH,senH,cosH,VCH,Eh); %-----MATRIZ "K" (T/m)
%...Estructura con disipadores TADAS
b=17;h=17;t=2.5; % Dimensiones de una placa del TADAS en cm
fy=3200;alfa=0.02; % alfa es relacion de rigidez Kp/Ke
Est=2100000;% Modulo del acero en kg/cm2
qr=[5;5;3.64;1.87]; % Corrimientos relativos en cada piso; para iniciar el análisis
%---K equivalente 1 piso
Keq1=Es*adiag1/L(65); % Rigidez Axial de una diagonal
%---K equivalente 2 piso
n=12; % Número de placas. Son dos disipadores TADAS de 6 placas cada uno
[F,Kef(2),Zeda(2)]=rigidez_efectiva_TADAS(n,b,t,h,fy,qr(2),alfa,Est);
%---K equivalente 3-4 piso
for i=3:4
    n=6; % Número de placas
    [F,Kef(i),Zeda(i)]=rigidez_efectiva_TADAS(n,b,t,h,fy,qr(i),alfa,Est);
end
H=sp*100; % Altura de piso en cm.
hci=40;hcd=40;hdis=30;Lon=820;hv=80; % Dimensiones de columnas adyacentes
Kdiag=zeros([1 4]);
Keq=zeros([1 4]);
[Kdiag(2),Kef(2)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(2),Kef(2),adiag2*100^2,Est); % Rigidez equivalente de diagonal-disipador de piso 2
for i=3:4
    [Kdiag(i),Kef(i)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(i),Kef(i),adiag2*100^2,Est); % Rigidez equivalente de diagonal-disipador de piso 3 y 4
end
Keq=Kef/10; % Para tener en T/m

ELEMT=[Kef1;Kef1;Kef1;Kef1; % Rigidez equivalente de diagonal de piso 1
        Kef(2);Kef(2);Kef(2);Kef(2); % Rigidez equivalente de diagonal-disipador
        Kef(3);Kef(3);Kef(3);Kef(3);
        Kef(4);Kef(4);Kef(4);Kef(4)];
mbr=16;senT=seno(65:80);cosT=coseno(65:80); % Miembros con diagonales
VCT=VC(65:80,:); % Vector de colocación solo de diagonales
[KTA]=kgridez_tadas(mbr,ngl,ELEMT,senT,cosT,VCT); % Contribución de TADAS
KTT=KT+KTA;na=np; % KTT es la matriz de rigidez total del Pórtico A, reforzado
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl); % Partición de la matriz de rigidez
kba=kab';kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KLT=kaa-kab*inv(kbb)*kba % Matriz de rigidez lateral

```

La matriz de rigidez lateral que se obtiene es:

$$K_L^{(A)} = \begin{bmatrix} 167053.49 & -15767.06 & 1390.33 & -70.00 \\ -15767.06 & 27988.36 & -14875.55 & 1291.77 \\ 1390.33 & -14875.75 & 27750.55 & -14165.05 \\ -70.00 & 1291.77 & -14165.05 & 12927.56 \end{bmatrix}$$

6.5 PÓRTICO CON MURO DEL EJE D

Como ya se ha indicado para solucionar el problema de *columna corta* en el Pórtico D, se construyeron muros, como se muestra en la parte superior de la figura 43, de tal manera que las columnas adyacentes a los muros pasan a trabajar como cabezales de los muros estructurales.

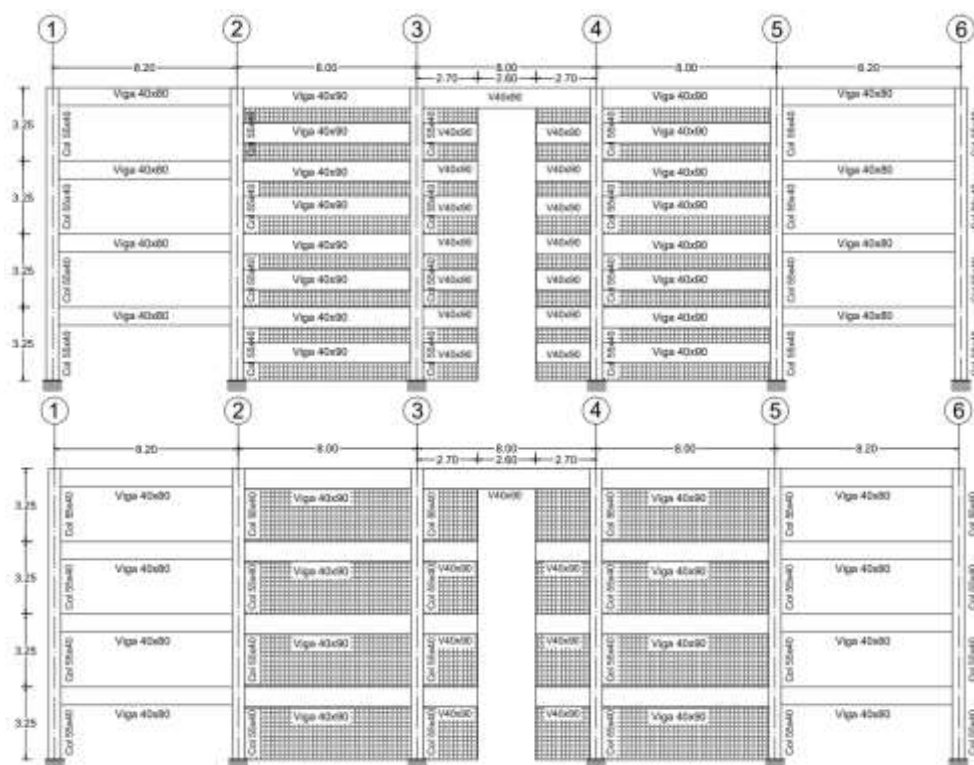


Figura 43 Pórtico del eje D del Parqueadero de ULEAM; en la gráfica superior se ven las vigas de entpiso y los muros que se construyeron para evitar el problema de columna corta; en la gráfica inferior se presenta los muros en cada piso, para el análisis sísmico.

Todas las columnas del eje D, adyacentes a los muros fueron reforzadas con placas de acero. En la parte inferior de la figura 43, se muestra un modelo simplificado de cálculo, sin la presencia de las vigas intermedias, con el cual se realizó el cálculo de la matriz de rigidez lateral. En la parte central se tiene una abertura por la presencia de una escalera interior que se observa en la figura 44.

Ahora lo que interesa es ilustrar cómo se obtiene la matriz de rigidez de una viga con dos sectores de rigidez infinita, que es lo que cambia en un pórtico con muros estructurales.



Figura 44 Muro en el Pórtico D, con columnas que pasan a trabajar como cabezales, reforzadas con placas de acero, se observa la grada central en el Piso 4

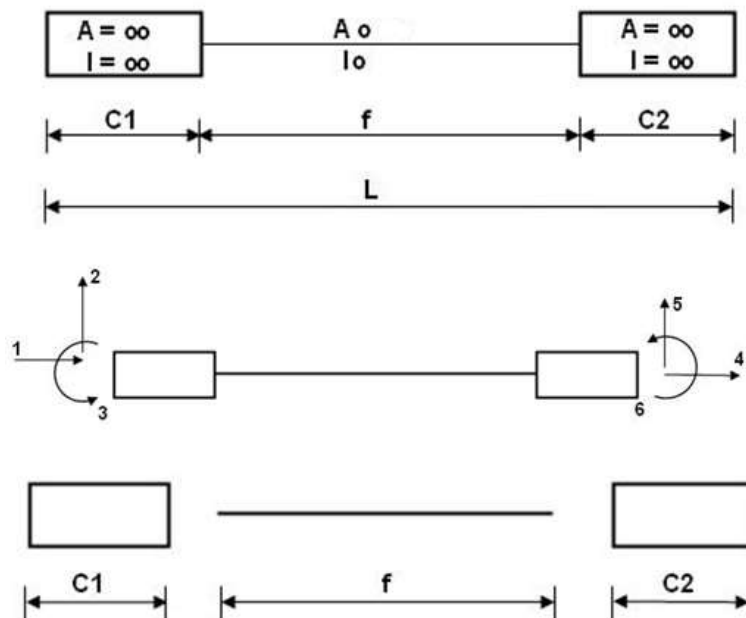


Figura 45 Modelo para el análisis de una viga con dos sectores de rigidez infinita
En la parte superior de la figura 45 se muestra una viga con dos sectores de rigidez infinita de longitudes c_1 longitud desde el eje de columna o muro hasta el borde en el nudo inicial; c_2 es la longitud desde el eje de columna o muro hasta el borde en el nudo final. La luz libre (longitud entre bordes de columnas o muros) se

denomina f .

En la parte central se muestra los grados de libertad en coordenadas locales del elemento viga con dos sectores de rigidez infinita y en la parte inferior de la figura 45 se muestra el artificio con el cual se obtiene la matriz de rigidez en coordenadas locales. Aguiar (2020). La matriz de rigidez en coordenadas locales es:

$$k_2 = \begin{bmatrix} r^* & & & & \\ 0 & t^* & & & \\ 0 & b^* + C_1 t^* & k^* + 2C_1 b^* + C_1^2 t^* & & \\ -r^* & 0 & 0 & r^* & \\ 0 & -t^* & -(b^* + C_1 t^*) & 0 & t^* \\ 0 & b^* + C_2 t^* & a^* + C_1 b^* + C_2 b^* + C_1 C_2 t^* & 0 & -(b^* + C_2 t^*) & k^* + 2C_2 b^* + C_2^2 t^* \end{bmatrix} \quad \text{SIMÉTRICA}$$

$$\begin{aligned} r^* &= \frac{EA_o}{f} & k^* &= \frac{4EI_o}{f} \left(\frac{1+\phi}{1+4\phi} \right) & a^* &= \frac{2EI_o}{f} \left(\frac{1-2\phi}{1+4\phi} \right) & k^* &= k^{**} \\ b^* &= \frac{6EI_o}{f^2} \left(\frac{1}{1+4\phi} \right) & t^* &= \frac{12EI_o}{f^3} \left(\frac{1}{1+4\phi} \right) & b^{**} &= b^* \end{aligned}$$

7. MATRIZ DE RIGIDEZ EN COORDENADAS DE PISO

Se considera que la losa es completamente rígida en el plano, además se consideran tres grados de libertad por planta, los mismos que se ubican en el centro de masas de cada piso. En la parte superior de la figura 46 se indican los grados de libertad, primero se han numerado los desplazamientos laterales en sentido X, desde el primer piso hasta el último piso; luego se numeran los desplazamientos laterales en sentido Y desde el piso 1 (grado de libertad 5) hasta el último piso y finalmente se numeran los grados de libertad torsionales (giro con respecto a un eje perpendicular al plano de la losa). Se denomina K_E a la matriz de rigidez en coordenadas de piso, la misma que se obtiene con la siguiente ecuación matricial.

$$K_E = \sum_{i=1}^n A^{(i)t} K_L^{(i)} A^{(i)} \quad (20)$$

Donde $A^{(i)}$ es la matriz de compatibilidad del pórtico i , que relaciona las coordenadas de piso con las coordenadas laterales de los pórticos; $K_L^{(i)}$ es la matriz de rigidez lateral del pórtico i ; la variable no definida todavía es n que es el número total de pórticos.

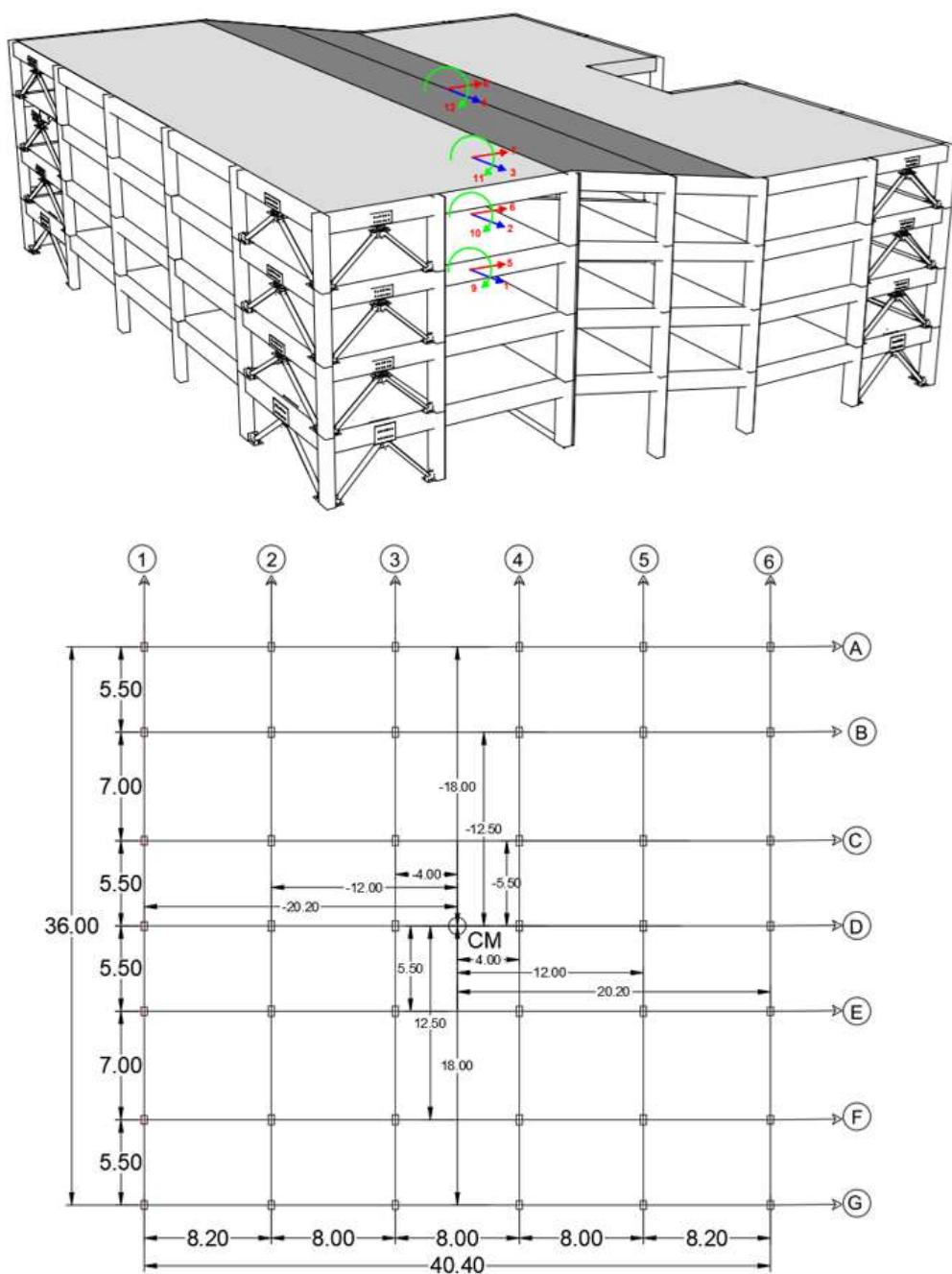


Figura 46 Grados de libertad en el Centro de Masas CM, para el análisis sísmico en 3D; en la parte inferior la distancia del CM a los pórticos.

A continuación, se indica la forma general de matriz de compatibilidad $A^{(i)}$

$$A^{(i)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & & \sin \alpha & & r_1 \\ & \cos \alpha & & \sin \alpha & & r_2 \\ & & \dots & & \dots & \dots \\ & & & \cos \alpha & & \sin \alpha & & r_n \end{bmatrix}$$

Siendo α el ángulo que forma la orientación positiva del pórtico con el eje de las X. Para pórticos paralelos al eje X este ángulo vale 0° y para pórticos perpendiculares al eje X vale 90° . Por otra parte r_j es la distancia desde el Centro de Masa al pórtico en el piso j, será positiva si la orientación del pórtico rota con respecto al centro de masa en sentido antihorario. La orientación positiva de los pórticos es paralela y en el sentido de los ejes X, Y. La matriz A tiene NP filas y $3 * NP$ columnas, donde NP es el número de pisos del pórtico para el caso más general.

En la parte inferior de la figura 48, se indican las distancias del Centro de Masas CM a cada uno de los pórticos, con su respectivo signo.

Tabla 1 Valores del ángulo α , y distancias del centro de masas a los pórticos.

PÓRTICO	α	DITANCIA DEL PÓRTICO AL CENTRO DE MASA R(m)			
		PISO 1	PISO 2	PISO 3	PISO 4
A	0	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00
B	0	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50
C	0	-5.50	-5.50	-5.50	-5.50
D	0	0	0	0	0
E	0	5.50	5.50	5.50	5.50
F	0	12.50	12.50	12.50	12.50
G	0	18.00	18.00	18.00	18.00
1	1	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00
2	1	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00
3	1	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
4	1	4.00	4.00	4.00	4.00
5	1	12.00	12.00	12.00	12.00
6	1	20.00	20.00	20.00	20.00

Se utilizó el programa **matriz_es1** para hallar la matriz de rigidez en coordenadas de piso. A continuación, se indica la forma de uso del programa que reporta la matriz de rigidez en coordenadas de piso y la matriz de compatibilidad.

- **[KE,A]=matriz_es1(ntot,NP,KLT,RT,ALPHA)**

Se ha denominado **ntot** al número total de pórticos; **NP** es el número de pisos; **KLT** es una gran matriz que contiene la matriz de rigidez lateral de cada uno de los pórticos, los mismos que se colocan uno encima de otro, es importante el orden, primero se debe colocar la matriz de rigidez lateral de los pórticos en sentido X (sentido de análisis sísmico) y luego en sentido Y. **RT** es otra gran matriz con las matrices **r** de cada pórtico, en el mismo orden que tienen las matrices de rigidez lateral en **KLT**, finalmente **ALPHA** es un vector con los valores del ángulo α indicados en la tabla 1.

Con el propósito de ver el uso de la función **matriz_es1** a continuación se presentan las sentencias con las cuales se obtiene la matriz de rigidez en coordenadas de piso para la estructura reforzada del ex parqueadero de la ULEAM. Se entiende que ya se han calculado las matrices de rigidez lateral de todos los pórticos denominados: KLA, KLB, etc.

```
rA=diag([-18.00,-18.00,-18.00,-18.00]);
rB=diag([-12.50,-12.50,-12.50,-12.50]);
rC=diag([-5.50,-5.50,-5.50,-5.50]);
rD=diag([0,0,0,0]);
rE=diag([5.50,5.50,5.50,5.50]);
rF=diag([12.50,12.50,12.50,12.50]);
rG=diag([18,18,18,18]);
r1=diag([-20.20,-20.20,-20.20,-20.20]);
r2=diag([-12,-12,-12,-12]);
r3=diag([-4,-4,-4,-4]);
r4=diag([4,4,4,4]);
r5=diag([12,12,12,12]);
r6=diag([20.20,20.20,20.20,20.20]);
KLX=[KLA;KLB;KLC;KLD;KLE;KLF;KLG]; KLY=[KL1;KL2;KL3;KL4;KL5;KL6];
KLT=[KLX;KLY];
RTX=[rA;rB;rC;rD;rE;rF;rG]; RTY=[r1;r2;r3;r4;r5;r6];
RT=[RTX;RTY];
ALPHA=[0;0;0;0;0;0;0;90;90;90;90;90];
ntot=13;% número de pórticos
NP=4;% NP número de pisos
[KE,A]=matriz_es1(ntot,NP,KLT,RT,ALPHA);
```

8. MATRIZ DE MASAS Y PROPIEDADES DINÁMICAS

No existe programa para determinar la matriz de masas en coordenadas de piso. Por lo tanto, el usuario debe programar la matriz de masas, que es muy sencillo, lo difícil es saber determinar la carga permanente. Nuevamente se destaca que uno de los objetivos del sistema de computación **CEINCI-LAB** es que el usuario también haga su parte programando cosas fáciles de hacerlo, de esta forma tiene un mayor conocimiento de lo que está realizando.

La matriz de masas **M** se obtiene evaluando la energía cinética de la estructura y para el análisis sísmico de una estructura en coordenadas de piso, la matriz de masas, para un caso general, es la siguiente. Aguiar (2014)

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & & \\ & m & \\ & & J \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & \ddots \\ & & & m_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & & \\ & J_2 & \\ & & \ddots \\ & & & J_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

Siendo m_1 la masa total del piso 1; m_2 la masa total del piso 2, etc.; J_1 es el momento de inercia de la masa m_1 con respecto al Centro de Masas CM del piso 1; J_2 es el momento de inercia de la masa m_2 con respecto al CM del piso 2, etc.

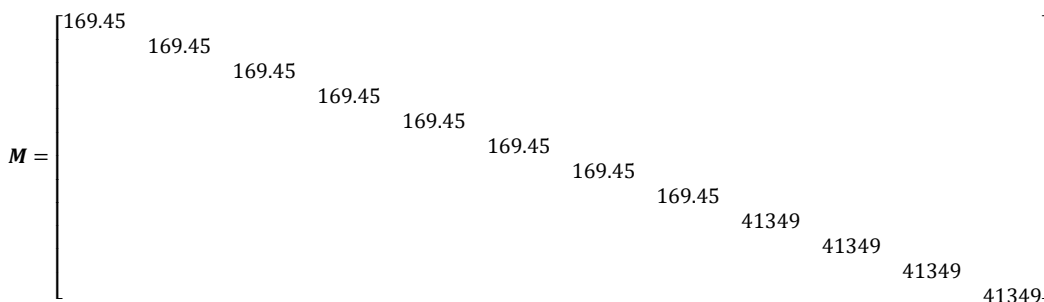
A continuación, se indica la matriz de masas de la estructura sin reforzamiento y de la estructura reforzada, se destaca que el peso se incrementó en un 6%, lo cual es adecuado para no tener que reforzar toda la cimentación. Los antepechos que existían en la periferia fueron derrocados. Por otra parte, se cambió el uso de la estructura de Parqueadero a un edificio Administrativo.

- **Estructura sin reforzamiento**

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 160.86 & & & & & & & & \\ & 160.86 & & & & & & & \\ & & 160.86 & & & & & & \\ & & & 160.86 & & & & & \\ & & & & 160.86 & & & & \\ & & & & & 160.86 & & & \\ & & & & & & 160.86 & & \\ & & & & & & & 160.86 & \\ & & & & & & & & 39252 \\ & & & & & & & & & 39252 \\ & & & & & & & & & & 39252 \\ & & & & & & & & & & & 39252 \end{bmatrix}$$

Las propiedades dinámicas, definidas por sus períodos, frecuencias naturales y modos de vibración fueron obtenidas con el programa **orden_eig**

- **Estructura reforzada**



- **$[T, fi, OM] = \text{orden\_eig}(K, M)$**

Donde K es la matriz de rigidez; M es la matriz de masas; T es un vector que contiene a los períodos de vibración en cada uno de los modos; fi es la matriz con los modos de vibración; en OM se tiene las frecuencias naturales.

El período de vibración de la estructura, sin reforzamiento es $T = 0.855 \text{ seg}$ y de la estructura reforzada es $T = 0.611 \text{ seg}$. La altura de la estructura $H = 31.75 \text{ m}$. Luego la relación H/T en la estructura no reforzada es $\frac{H}{T} = 37.14$, y en la estructura reforzada es $\frac{H}{T} = 51.93$

La relación H/T define el Índice de Vulnerabilidad de Rigidez de una estructura. En forma general se puede indicar que si $\frac{H}{T} < 30$, la estructura es flexible; si $30 < \frac{H}{T} < 70$; la estructura se considera con rigidez normal y si $\frac{H}{T} > 70$ la estructura es rígida. Guendelman (2000); Aguiar y Zambrano (2018).

Los valores de la relación H/T para los dos casos (sin y con reforzamiento) se hallan en el rango de estructuras normales, desde el punto de vista de la rigidez. ¿Por qué tuvo un daño considerable la estructura? La respuesta es debido a que en la estructuración sísmica se crearon *columnas cortas*, en todos los pórticos perimetrales y en el eje "D".

9. ACABADOS DE LA ESTRUCTURA

Las autoridades de la ULEAM decidieron cambiar el uso de la estructura de parqueadero a edificio administrativo. Desde el punto de vista estructural es beneficioso el cambio ya que se reduce la carga transitoria. Las fotografías de la parte superior de la figura 47 muestran los trabajos que se realizaron para las nuevas funciones del edificio; a la izquierda se ven las instalaciones que se han colocado al lado de las vigas, cuyo peralte de 80 cm, les permite realizar este trabajo sin causar problemas en la movilidad de la gente. Se destaca que todas las paredes son de Gypsum que es un material liviano y flexible, se comporta muy bien durante un terremoto.



Figura 47 Cambio de función de parqueadero a edificio administrativo; en la fotografía superior izquierda se ven las instalaciones al lado de las vigas; a la derecha las rampas pasan a ser auditorios y abajo una panorámica donde está terminado el segundo piso.

En las rampas del parqueadero se construyeron Auditorios, para el efecto con madera se conformaron las plataformas horizontales que se ven en la fotografía superior derecha.

En la fotografía inferior de la figura 47, se observa el segundo piso prácticamente terminado, se aprecia que algunos elementos de fachada se los ha construido con madera; se ve también en los pisos 3 y 4 que no existen los antepechos de mampostería que eran los que crearon el problema de *columna corta* en los pórticos perimetrales (todos los antepechos se eliminaron).

Las diagonales con disipadores (pisos 2 al 4) al igual que las diagonales del primer piso quedaron visibles; esto es positivo ya que se podrá ver el estado de los disipadores. La estructura se encuentra aproximadamente a 1 km de la playa en una zona elevada por lo que no va a tener problemas de Tsunamis.

Se recomienda que periódicamente se de mantenimiento a todo el reforzamiento con acero, especialmente los elementos que están en la parte exterior (fachadas de figura 47) por el ambiente marino de la zona.

10. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El objetivo principal del artículo fue enseñar el uso de las funciones del sistema de computación **CEINCI-LAB** para generar: pórticos regulares, pórticos a desnivel; pórticos irregulares y pórticos especiales que se tienen en un parqueadero. Se ha visto que con pocos datos de entrada se genera en forma muy sencilla pórticos con geometría compleja, en los cuales se puede considerar un nudo en la mitad de la viga o no.

Una fortaleza de **CEINCI-LAB** es la generación de estructuras en forma muy sencilla, eso se lo ha visto a lo largo del artículo con la realización de una gran cantidad de ejemplos. A los pórticos indicados en el párrafo anterior se les ha colocado diagonales de acero concéntricas, en el primer piso se reforzó de esa manera, pero en los pisos superiores se reforzó con disipadores TADAS sobre diagonales de acero, para el análisis estructural este sistema diagonal-disipador se modeló con una diagonal equivalente.

No solo interesa enseñar la generación de pórticos sino también como se encuentra la matriz de rigidez lateral y la matriz de rigidez en coordenadas de piso considerando un modelo de piso rígido con tres grados de libertad por planta; para el efecto se presentó la teoría en forma rápida y las funciones de **CEINCI-LAB** con las cuales se logra hallar las matrices de rigidez indicadas.

El uso de **CEINCI-LAB** se realizó en la estructura del parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro ULEAM de Manta, que fue afectada por el terremoto de Pedernales de 2016 ($M=7.8$) se explican las causas de su mal comportamiento y se indica la forma como fue reforzada la estructura, de tal manera que no se descuidó el tema estructural, al contrario se dedicó bastantes páginas a presentar los problemas y dar recomendaciones de cómo proceder en el diseño de un parqueadero y la forma cómo se reforzó.

DEDICATORIA

Este artículo está dedicado al Ing. Fernando Del Castillo, con quien el primero de los autores realizó el diseño estructural del reforzamiento; falleció el 28 de abril de 2020, a causa de un cáncer. También está dedicado al Dr. Miguel Camino, ex Rector de la ULEAM, que falleció el 3 de febrero de 2021, por el covid-19; aparecen en la parte central de la fotografía de la figura 48.

Sin lugar a duda, la ciudad de Manta y la Universidad Laica Eloy Alfaro ULEAM perdieron a dos grandes hombres que aportaron al ornato de Manta con el diseño y construcción de edificios de altura y residencias de bajos pisos. Fueron dos académicos que dedicaron sus mejores años a la enseñanza y a la investigación científica.



Figura 48 Douglas Álvarez, constructor; Solorzano, fiscalizador; Fernando Del Castillo, asesor estructural; Miguel Camino, Rector ULEAM; Darío Páez, Decano de Ingeniería; David del Castillo, autor de tesis sobre el reforzamiento de parqueadero de ULEAM.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., (2020) *Análisis Matricial de Estructuras con CEINCI-LAB*, Quinta Edición. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 575 p.
2. Aguiar R., Cagua B., Pilatasig J., (2019), "Nuevas funciones del sistema **CEINCI-LAB** para análisis sísmico espacial", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24,3**, 259-276.
https://www.researchgate.net/publication/335777929_NEW_FUNCTIONS_OF_THE_CEINCI-LAB_SYSTEM_FOR_3-D_SEISMIC_ANALYSIS
3. Aguiar R., Del Castillo F., (2019), "Primeros trabajos en el reforzamiento sísmico de parqueadero de la ULEAM", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24, 1**, 39-71.
https://www.researchgate.net/publication/331608129_FIRST_WORKS_IN_THE_SEISMIC_REINFORCEMENT_OF_PARKING_LOT_OF_THE_ULEAM
4. Aguiar R., Zambrano V., (2018), "Relación H/T en estructuras de Bahía de Caráquez y el terremoto de 2016", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **23, 2**, 227-241.
https://www.researchgate.net/publication/326160952_RELATION_HT_IN_STRUCTURES_OF_BAHIA_DE_CARAQUEZ_AND_THE_2016_EARTHQUAKE
5. Aguiar R., Rodríguez M., Mora D., (2016), *Análisis sísmico de estructuras con disipadores ADAS o TADAS*. Centro Internacional de Métodos

Numéricos en Ingeniería CIMNE. Universidad Politécnica de Cataluña, **IS-75**, 170 p. Barcelona.
https://www.researchgate.net/publication/303256522_Analisis_Sismico_de_Estructuras_con_Disipadores_de_Energia_ADAS_o_TADAS

6. Cagua B., Pilatasig J., (2019, 1), "Generación de Pórticos con nudos intermedios en las vigas" *Curso de Dinámica de Estructuras, Maestría de Estructuras de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE*.
7. Cagua B., Pilatasig J., (2019, 2), "Generación de Pórticos Irregulares con nudo intermedio en las vigas" *Curso de Dinámica de Estructuras, Maestría de Estructuras de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE*.
8. Del Castillo David, (2018), *Reconstrucción del Parqueadero de la ULEAM*, Tesis de grado. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.
9. Guendelman T., (2000), "Perfil Bio-Sísmico de edificios: un instrumento de calificación sísmica de edificios", *Revista Técnica de la Construcción*, **17**, internet: www.revistabit.cl
10. Velásquez D., (2021), "Generación de pórticos a desnivel" *Curso de Análisis Sísmico en pregrado. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE*.